



TUGAS AKHIR - RF 141501

**KARAKTERISASI FISIS HUBUNGAN DENSITAS,
RESISTIVITAS, KECEPATAN (VP), DAN ATENUASI
PADA BATUAN VULKANIK (STUDI KASUS GUNUNG
ARJUNO-WELIRANG, JAWA TIMUR)**

**YULIA NUR FAJRINA
NRP.3712100025**

**Dosen Pembimbing
Wien Lestari, S.T., M.T.
Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.**

**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”



UNDERGRADUATE THESIS - RF 141501

**PHYSICAL CHARACTERIZATION OF RELATIONS
BETWEEN DENSITY, RESISTIVITY, VELOCITY (VP),
AND ATTENUATION ON VOLCANIC ROCKS, (CASE
STUDY MT.ARJUNO-WELIRANG, EAST JAVA)**

**YULIA NUR FAJRINA
NRP.3712100025**

**Lecturers
Wien Lestari, S.T., M.T.
Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.**

**GEOPHYSICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2016**

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

**KARAKTERISASI FISIS HUBUNGAN DENSITAS,
RESISTIVITAS, KECEPATAN (VP), DAN ATENUASI
PADA BATUAN VULKANIK STUDI KASUS
GUNUNG ARJUNO-WELIRANG, JAWA TIMUR**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 15 Juli 2016

Menyetujui,

Dosen Pembimbing 1,



Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2003



Dosen Pembimbing 2,



Firman Syaifuddin, S.Si, M.T.
NIP. 19840911 201404 1001

Mengetahui
Kepala Laboratorium
Petrofisika



Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 19811002 201212 2003

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

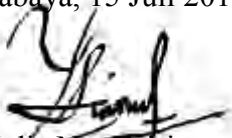
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Karakterisasi Fisis Hubungan Densitas, Resistivitas, Kecepatan (V_p), dan Atenuasi pada Batuan Vulkanik (Studi Kasus Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur)”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 15 Juli 2016



Yulia Nur Fajrina
NRP. 3712100025

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Yang Maha Esa karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga pelaksanaan tugas akhir berjalan lancar dan pembuatan laporan tugas akhir yang berjudul “Karakterisasi Fisis Hubungan Densitas, Resistivitas, Kecepatan (Vp), dan Atenuasi pada Batuan Vulkanik (Studi Kasus Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur)” dapat diselesaikan dengan baik.

Dalam penyusunan laporan ini tidak terlepas dari peran berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Widya Utama, DEA selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika ITS dan Dosen Penguji pada sidang akhir yang selalu memberi masukan membangun.
2. Ibu Wien Lestari, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
3. Bapak Firman Syaifuddin, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir dan pembimbing untuk penelitian *subvolcanic reservoir exploration*.
4. Ibu Anik Hilyah, S.Si., M.T. selaku Dosen Penguji dan telah memberikan banyak masukan untuk metode pengukuran fisika batuan.
5. Mamah, Papah, Mas Bagus, dan Avin, motivator utama hidup untuk selalu belajar dan menjadi orang yang bermanfaat.
6. Teman-teman lab eksplorasi dan petrofisika terutama untuk penelitian *subvolcanic* dan *converted wave* beserta teman seperjuangan untuk wisuda 114, lulusan pertama Teknik Geofisika ITS, yang tak pernah lelah memberikan semangat.
7. Keluarga TG-01 yang selalu memberikan dukungan do'a maupun bantuan fisik dan jasa untuk tugas akhir ini dan rumah kedua bagi penulis

8. Seluruh keluarga HMTG, yang selalu memberikan dukungan dan tempat untuk berbagi, berkembang, dan bermanfaat bagi orang lain.
9. Rekan-rekan SPE ITS SC, XL Future Leaders 3 Surabaya (Excelso), yang selalu memotivasi untuk menjadi orang yang lebih professional dan disenangi dalam bekerjasama.
10. Segenap pihak yang telah membantu dan membimbing penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Dengan segala keterbatasan, Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun penulis harapkan untuk pengembangan di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan

Surabaya, Juli 2016

Penulis

KARAKTERISASI FISIS HUBUNGAN DENSITAS, RESISTIVITAS, KECEPATAN (VP), DAN ATENUASI PADA BATUAN VULKANIK (STUDI KASUS GUNUNG ARJUNO-WELIRANG, JAWA TIMUR)

Nama : Yulia Nur Fajrina
NRP : 3712100025
Jurusan : Teknik Geofisika FTSP-ITS
Pembimbing : Wien Lestari, S.T., M.T.
Firman Syaifuddin, S.Si, M.T.

ABSTRAK

Sebuah kawasan yang memiliki aktivitas vulkanik, mempunyai potensi SDA yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas bumi hingga cadangan hidrokarbon. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengkarakterisasi fisis dan analisa hubungan antara parameter densitas, kecepatan Vp, atenuasi, dan resistivitas pada batuan vulkanik studi kasus Gunung Arjuno-Welirang. Penelitian diawali dengan pengambilan sampel di lapangan dan pembuatan coring batuan sehingga didapatkan 45 coring batuan, dari 16 sampel batuan, yang mewakili 6 satuan batuan, kemudian dilakukan pengukuran parameter resistivitas dengan metode konfigurasi eaxial resistivity, pengukuran densitas dengan prinsip Archimedes, dan pengukuran kecepatan Vp serta atenuasi dengan transmisi gelombang ultrasonik. Maka didapatkan hasil rentang parameter densitas batuan vulkanik Arjuno Welirang berkisar antar 2400 – 2900 kg/m³, sedangkan rentang resistivitas bervariasi dari 30-185 kOhm.m, kemudian rentang nilai kecepatan Vp bervariasi dari 5100-6700 m/s, dengan koefisien atenuasinya memiliki rentang 0.05–0.23x10⁻³dB/m, dimana nilai densitas akan berbanding lurus dengan kecepatan Vp, dan nilai resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan Vp Berdasarkan perbedaan trend dan sebaran data pada crossplot, maka batuan vulkanik sampel dapat dikelompokkan 3 kategori produk batuan vulkanik, yakni produk kategori lava, piroklastik,

dan lava vesikular. Berdasarkan analisa petrologi batuan vulkanik Arjuno-Welirang memiliki tipe intermediate-mafik dengan nama batuan dominasi andesit-basaltik dan basalt.

Kata kunci : Atenuasi, Batuan Vulkanik, Densitas, Kecepatan V_p , Resistivitas

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF RELATIONS BETWEEN DENSITY, RESISTIVITY, VELOCITY (VP), AND ATTENUATION ON VOLCANIC ROCKS, (CASE STUDY MT.ARJUNO-WELIRANG, EAST JAVA)

Student Name : Yulia Nur Fajrina
Student ID Number : 3712100025
Department : Teknik Geofisika FTSP-ITS
Lecturers : Wien Lestari, S.T., M.T.
Firman Syaifuddin, S.Si., M.T.

ABSTRACT

An area where has volcanic activity, have the potential of natural resources that can be utilized as a source of geothermal energy as far as a hydrocarbon reserves. The purpose of this study is to characterize the physical and analyze the relation between parameters of density, velocity V_p , attenuation, and resistivity in the volcanic rock for Mt.Arjuno-Welirang casr study. The study begins by field sampling and coring the rocks so it was gotten 45 coring rocks, from 16 rock samples, representing 6 lithologies, then measuring the parameters of resistivity with the configuration method axial resistivity, density measurements by Archimedes principle, and measurement Velocity V_p and attenuation by using the ultrasonic wave transmission. Then the results obtained that parameter ranges of Arjuno Welirang density volcanic rocks are between 2400 - 2900 kg / m³, while the resistivity ranges varying from 30-185 kOhm.m, then the range of values velocity V_p are 5100-6700 m / s, the attenuation coefficient ranges 0.05-0.23x10⁻³dB / m. The density parameter proportional to velocity V_p , and the resistivity values will be inversely proportional to the density-velocity V_p . Based on the differences in trends and distribution of data on crossplot, volcanic rock samples can be grouped by three categories of products of volcanic rock, the product of lava, pyroclastic and

lava vesicular. Based on an analysis of volcanic rocks petrology Arjuno-Welirang has a type of intermediate-mafic rock with the name of domination basaltic andesite and basalt.

Keywords: Attenuation, Volcanic Rock, Density, Resistivity, Velocity V_p

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	v
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKIR	vii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRAK BAHASA INGGRIS	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Geologi Daerah Penelitian	5
2.2 Batuan Vulkanik	12
2.3 Komposisi Mineral Batuan Vulkanik	17
2.4 Karakteristik Fisik Batuan Vulkanik	19
2.4.1 Densitas Batuan Vulkanik	19
2.4.2 Kecepatan Vp Batuan Vulkanik	21
2.4. 3 Atenuasi Gelombang Seismik pada Batuan Vulkanik	23
2.4.4 Resistivitas Batuan Vulkanik	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Peralatan dan Lokasi Penelitian	31
3.1.1 Peralatan Penelitian	31
3.1.2 Lokasi Penelitian	31
3.2 Tahapan Penelitian	34

3.2.1 Studi Literatur dan Tinjauan Geologi	34
3.2.2 Pengambilan Sampel Batuan di Lapangan	35
3.2.3 Pengukuran Karakter Fisis Sampel Batuan	38
3.2.4 Pengolahan Data	42
3.2.5 Pendeskripsian Petrologi Batuan	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Analisa Petrologi Batuan Vulkanik	47
4.2 Analisa Karakterisasi Fisis Batuan Vulkanik	53
4.2.1 Analisa Karakter Densitas Batuan Vulkanik	53
4.2.2 Analisa Karakter Resistivitas Batuan Vulkanik	56
4.2.3 Analisa Karakter Kecepatan Vp Batuan Vulkanik	59
4.2.1 Analisa Karakter Atenuasi Batuan Vulkanik	61
4.3 Analisa Hubungan Parameter Fisis Batuan Vulkanik	63
4.3.1 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Kecepatan Vp	63
4.3.2 Analisa Hubungan Parameter Resistivitas dengan Kecepatan Vp	65
4.3.3 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Resistivitas	66
4.3.4 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Atenuasi	68
4.3.5 Analisa Hubungan Parameter Kecepatan Vp dengan Atenuasi	69
4.3.6 Analisa Hubungan Parameter Resistivitas dengan Atenuasi	71
4.4 Analisa Integrasi	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
5.1 Kesimpulan	81
5.2 Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	85
BIOGRAFI PENULIS	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta Geologi daerah Gunung Arjuno Welirang dan wilayah fokus penelitian	5
Gambar 2.2	Komponen satuan batuan dan struktur geologi Komplek Gunung Arjuno-Welirang	7
Gambar 2.3	Bagan alir batuan beku volkaniklastik	13
Gambar 2.4	Klasifikasi non-genetis batuan piroklastik yang didasarkan pada: (a) komposisi batuan, dan (b) ukuran material penyusunnya	15
Gambar 2.5	Penggambaran bentuk batuan beku intrusif	16
Gambar 2.6	Contoh lokasi pembentukan batuan beku felsik	17
Gambar 2.7	Contoh lokasi pembentukan batuan beku <i>intermediate</i>	18
Gambar 2.8	Contoh lokasi pembentukan batuan beku mafik	18
Gambar 2.9	Korelasi antara komposisi mineral dan densitas untuk batuan beku menurut Dortman	19
Gambar 2.10	Rentang nilai densitas rata-rata batuan beku dan batuan metamorf	20
Gambar 2.11	Grafik Perbandingan hubungan V_p dan density brocher terhadap persamaan gardner, godfrey, Christensen, and nafe-drake pada batuan kerak benua	22
Gambar 2.12	Hubungan antara Q^{-1} dengan velocity V_p pada tekanan hidrostatik, frekuensi=32 Hz (Merkulova et al, 1972). 1-quartz (<i>thermal cracked</i>), 2-quartz, 3-granit	25
Gambar 2.13	Nilai rata-rata untuk resistivitas elektrik dan permitivitas dielektrik pada tipe-tipe batuan, penunjuk panah menunjukkan efek dari pori dan fracture yang terisi air	28
Gambar 3.1	Desain elektroda resistivitymeter untuk pengukuran resistivitas secara radial	31
Gambar 3.2	<i>Ultrasonic oscilloscope</i> untuk pengukuran kecepatan V_p dan atenuasi batuan	32

Gambar 3.3	Peta lokasi pengambilan sampel batuan pada 6 titik lokasi satuan batuan di Gunung Arjuno – Welirang	33
Gambar 3.4	Diagram alir penelitian tugas akhir	34
Gambar 3.5	Pengambilan sampel untuk singkapan di lapangan	35
Gambar 3.6	Hasil sampel coring dengan berbagai dimensi	38
Gambar 3.7	Proses pengeringan sampel dengan oven	38
Gambar 3.8	Proses pengukuran variabel massa kering (mk) batuan untuk pengukuran parameter densitas	39
Gambar 3.9	Alat sonic wave analyzer, transducer, receiver, dan osiloskop sebagai alat pengukuran kecepatan Vp dan atenuasi batuan	40
Gambar 3.10	Pengukuran Resistivitas	42
Gambar 3.11	Proses pengambilan data t pada grafik <i>display</i> osiloskop	43
Gambar 3.12	Zero crossing method	44
Gambar 3.13	Proses pengambilan data atenuasi gelombang dari grafik <i>display</i> osiloskop	44
Gambar 3.14	Simulasi hasil pengukuran tahanan jenis batuan	45
Gambar 3.15	Diagram alir deskripsi batuan beku	46
Gambar 4.1	<i>Hand sampling section</i> Satuan Lava Anjasmara (Qla) dengan pembesaran 100 x	49
Gambar 4.2	<i>Hand sampling section</i> Satuan Lava Arjuno-Welirang Tua (Qltaw) dengan pembesaran 100 x	49
Gambar 4.3	<i>Hand sampling section</i> Satuan Lava Eruspsi Samping (Qes) dengan pembesaran 100 x	50
Gambar 4.4	<i>Hand sampling section</i> Satuan Lava Welirang I (Qlw I) dengan pembesaran 100 x	50
Gambar 4.5	<i>Hand sampling section</i> Satuan Aliran Piroklastik Tua Arjuno Welirang (Qaptaw) dengan pembesaran 100 x	51
Gambar 4.6	<i>Hand sampling section</i> Satuan Aliran	51

	Piroklastik Welirang (Qapw) dengan pembesaran 100 x	
Gambar 4.7	Diagram Reaksi Bowen	52
Gambar 4.8	<i>Crossplot</i> hubungan Densitas-Vp pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	64
Gambar 4.9	<i>Crossplot</i> hubungan Resistivitas-Kecepatan Vp pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	65
Gambar 4.10	<i>Crossplot</i> hubungan Densitas-Resistivitas pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	67
Gambar 4.11	<i>Crossplot</i> hubungan Densitas-Koefiesien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	68
Gambar 4.12	<i>Crossplot</i> hubungan Kecepatan Vp-Koefiesien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	70
Gambar 4.13	<i>Crossplot</i> hubungan Resistivitas-Koefiesien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)	71
Gambar 4.14	Detail sampel satuan batuan yang telah diambil dilihat dari penampang <i>cross-section</i>	74
Gambar 4.15	3D <i>Crossplot</i> Densitas (gram/cm^3) -Kecepatan Vp (km/s) –Resistivitas (kOhm.m) Batuan Vulkanik berdasarkan satuan batuan	76
Gambar 4.16	3D <i>Crossplot</i> Densitas (gram/cm^3) -Kecepatan Vp (km/s) –Resistivitas (kOhm.m) Batuan Vulkanik berdasarkan produk batuan vulkanik	77

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Ukuran butir Piroklas dan Batuan Piroklastik	14
Tabel 2.2	Koefisien atenuasi (pada frekuensi 50 Hz) dan velocity berbagai jenis batuan	24
Tabel 2.3	Nilai resistivitas dan permtivitas pada beberapa tipe mineral	29
Tabel 3.1	Daftar nama sampel, satuan batuan, dan lokasi pengambilan sampel	32
Tabel 3.2	Daftar sampel coring dan dimensinya	37
Tabel 4.1	Daftar analisa petrologi singkat dari setiap sampel satuan batuan vulkanik	48
Tabel 4.2	Hasil pengukuran densitas kering batuan vulkanik	53
Tabel 4.3	Rangkuman perhitungan statistik densitas kering batuan vulkanik	55
Tabel 4.4	Hasil pengukuran resistivitas kering batuan vulkanik	56
Tabel 4.5	Rangkuman perhitungan statistik resistivitas kering batuan vulkanik	58
Tabel 4.6	Hasil pengukuran kecepatan Vp batuan vulkanik	59
Tabel 4.7	Hasil perhitungan statisktik kecepatan Vp batuan vulkanik	60
Tabel 4.8	Hasil pengukuran koefisien atenuasi batuan vulkanik	61
Tabel 4.9	Rangkuman perhitungan statistik koefisien atenuasi batuan vulkanik	62
Tabel 4.10	Persamaan hubungan parameter Densitas-Vp dan inversnya	64
Tabel 4.11	Persamaan hubungan parameter Resistivitas-Vp dan inversnya	66
Tabel 4.12	Persamaan hubungan parameter Densitas-Resistivitas dan inversnya	67
Tabel 4.13	Persamaan hubungan parameter Koefisien	69

	Atenuasi-Densitas dan inversnya	
Tabel 4.14	Persamaan hubungan parameter Kecepatan Vp- Koefisien Atenuasi dan inversnya	71
Tabel 4.15	Persamaan hubungan parameter Resistivitas- Koefisien Atenuasi dan inversnya	72
Tabel 4.16	Rangkuman persamaan setiap hubungan parameter dan koefisien determinan	72
Tabel 4.17	Data densitas, kecepatan Vp, dan resistivitas, setiap sampel batuan vulkanik beserta deskripsi petrologi kondisi sampel	75

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil data pengukuran resistivity setiap batuan	85
Lampiran 2	Hasil data pengukuran atenuasi	89
Lampiran 3	Hasil deskripsi petrologi batuan vulkanik	91
Lampiran 4	Beberapa hasil pengambilan data time travel untuk kecepatan Vp dan amplitude atenuasi	98
Lampiran 5	Data statistik pengukuran densitas	100
Lampiran 6	Data statistik pengukuran resistivitas	102
Lampiran 7	Data statistik pengukuran kecepatan Vp	104
Lampiran 8	Data statistik pengukuran koefisien atenuasi	106

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Letak Indonesia yang berada di kawasan Cincin Api Pasifik menyebabkan Indonesia memiliki banyak gunung api yang aktif dan potensi gempa bumi yang cukup tinggi. Cincin Api Pasifik adalah sebuah kawasan aktif dari segi tektonik dan vulkanik yang mengelilingi Samudra Pasifik. Di Indonesia, sebaran gunung aktif dibagi menjadi empat busur gunung api, yakni Busur Gunung Api Sunda, Busur Gunung Api Banda, Busur Gunung Api Halmahera, dan Busur Gunung Api Sulawesi Utara-Kepulauan Sangihe. (Bronto, 2001). Di lain sisi, kawasan yang memiliki aktivitas vulkanik aktif ini memiliki beberapa potensi sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan untuk kepentingan energi manusia, diantaranya sumber panas bumi dan cadangan hidrokrabon.

Sebuah sistem panas bumi dengan suhu yang tinggi letaknya terdapat di sepanjang zona vulkanik punggungan pemekaran benua, diatas zona subduksi dan anomali pelelehan lempeng. Batas-batas dari pertemuan lempeng yang bergerak merupakan pusat lokasi untuk munculnya sistem hidrotermal magma. Transfer energi panas secara konduksi dan konveksi pada lingkungan tektonik lempeng diperbesar oleh gerakan magma dan sirkulasi hidrotermal. Energi panas bumi 50 % ada di dalam magma, 43 % di dalam batuan kering panas (*hot dry rock*), dan 7 % di dalam sistem hidrotermal. (Sumitadirera, 2000)

Selain sumber panas bumi, cadangan hidrokarbon di lingkungan vulkanik merupakan salah satu potensi dan tantangan baru di dunia eksplorasi. Terdapat teori geologi yang menyatakan lingkungan *sub-volcanic* dapat menghasilkan *petroleum system*. Batuan vulkanik dapat membentuk batuan tudung non-permeabel yang menutupi batuan *reservoir* maupun batuan penghalang yang membantu proses migrasi fluida dari batuan induk ke batuan *reservoir*. (Holford, 2012)

Sehingga dari potensi geologi yang dimiliki tersebut, perlu adanya penelitian lebih lanjut untuk mengkarakterisasi batuan vulkanik di Indonesia. Sampai saat ini karakterisasi fisis yang berhasil dilakukan oleh metode geofisika untuk batuan vulkanik hanya metode *gravity*, geolistrik, magnetik dan elektromagnetik. Sedangkan metode sesimik yang memanfaatkan kecepatan gelombang serta mampu menembus

kedalaman bawah permukaan cukup dalam, belum menghasilkan gambaran karakterisasi fisis bawah permukaan yang baik untuk diinterpretasikan. Sehingga karakterisasi fisis yang telah dilakukan pada penelitian yang ada sebelumnya hanya sebatas parameter density, kelistrikan, magnetik, dan elektromagnetik. Sedangkan parameter elastik belum jauh dilakukan penelitian.

Maka dari itu penelitian tugas akhir ini bermaksud untuk mengkatalogisasi batuan vulkanik dan mengkarakterisasi fisis batuan vulkanik di daerah penelitian dengan menganalisa hubungannya antara parameter densitas, resistivitas, V_p dan atenuasi. Sehingga diharapkan dengan adanya pengelompokkan data batuan vulkanik berdasarkan deskriptif petrologi beserta hubungan parameter fisisnya dapat membantu proses pemodelan *imaging* bawah permukaan dengan berbagai macam metode geofisika untuk kasus eksplorasi di lingkungan vulkanik.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik fisis batuan vulkanik terutama parameter densitas, resistivitas, kecepatan V_p dan atenuasi?
2. Bagaimana hubungan antara densitas, resistivitas, kecepatan V_p dan atenuasi pada batuan vulkanik?
3. Bagaimana membuat deskripsi petrologi batuan vulkanik?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Karakterisasi fisis batuan vulkanik terutama parameter densitas, resistivitas, kecepatan V_p dan atenuasi.
2. Analisa hubungan antara densitas, resistivitas, kecepatan V_p dan atenuasi pada batuan vulkanik.
3. Pembuatan deskripsi petrologi batuan vulkanik

1.4 Batasan Masalah/ Ruang Lingkup Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sampel yang diambil untuk keseluruhan proses penelitian tugas akhir ini merupakan batuan vulkanik permukaan.

2. Keseluruhan sampel diukur dengan kondisi sebagai batuan kering (*dry rocks*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai studi ilmiah karakterisasi fisis batuan vulkanik terutama parameter densitas, resistivitas, kecepatan V_p , dan atenuasi.
2. Sebagai referensi karakteristik fisik dan petrologi batuan vulkanik yang dapat digunakan dalam berbagai pemodelan geofisika untuk kasus eksplorasi di lingkungan vulkanik.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini, tersusun dalam lima bab yaitu :

Bab 1: Pendahuluan

Berisi latar belakang masalah, maksud dan tujuan, perumusan masalah dan manfaat tugas akhir.

Bab 2: Tinjauan Pustaka

Berisi mengenai kajian pustaka yang digunakan pada tugas akhir.

Bab 3: Metodologi Penelitian

Berisi tentang metode dan tahap pengambilan data.

Bab 4: Hasil dan Pembahasan

Berupa hasil data yang diperoleh, serta analisa yang dilakukan.

Bab 5: Kesimpulan

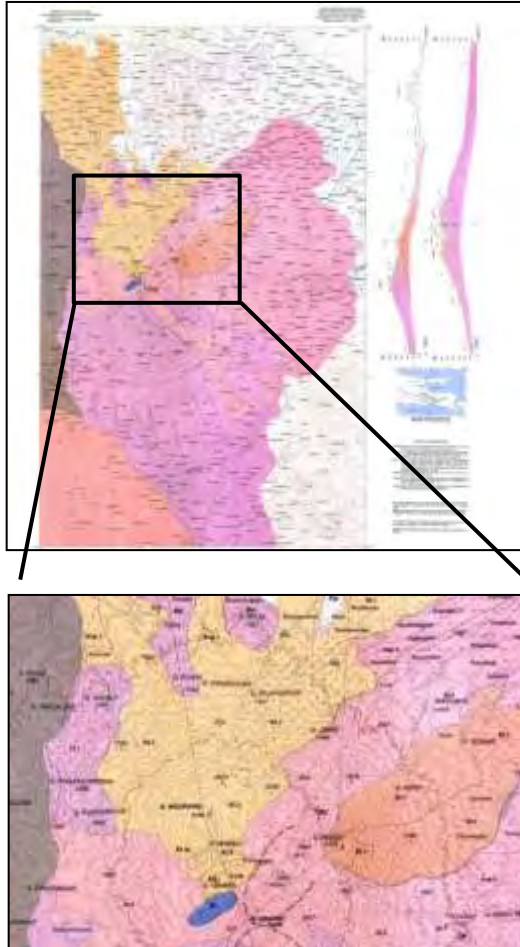
Berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian



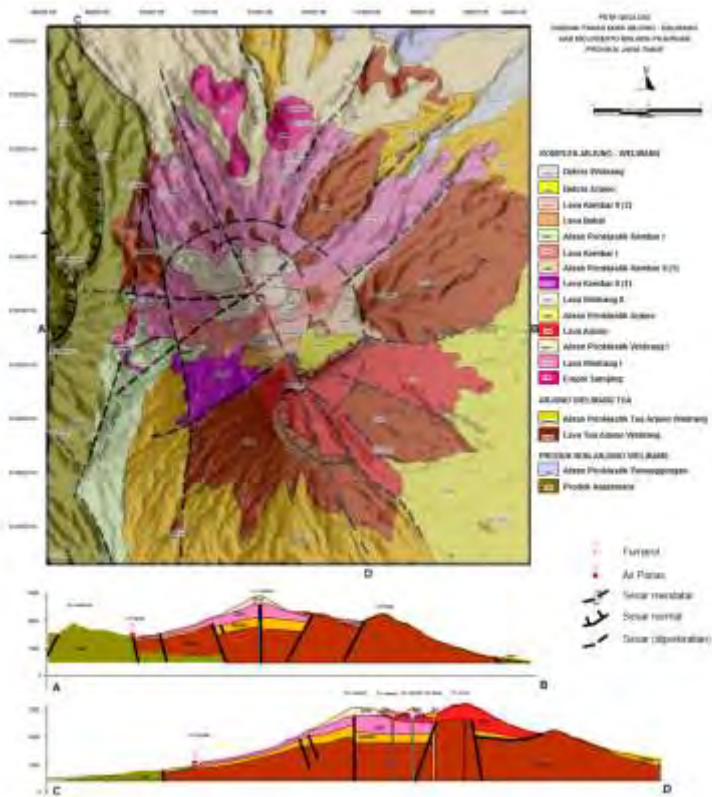
Gambar 2.1 Peta Geologi daerah Gunung Arjuno Welirang dan wilayah fokus penelitian

Secara regional, Jawa Timur dibagi menjadi beberapa zona fisiografis. Komplek Tengger terletak di Sub-zona Solo, bagian dari Zona Depresi Jawa Timur. Subzona Solo terbentuk oleh barisan gunung api berumur kuartar, mulai dari Plestosen hingga Holosen. Diantara gunung api-gunung api tersebut didapatkan dataran-dataran yang disebut dataran intramontana. Gunung api-gunung api yang dijumpai di sub-zona ini membentuk kelurusan gunung api dari barat berturut-turut Lawu, Wilis, Kelud, Arjuno-Welirang, Argopuro, Bromo-Tengger, Semeru, Ijen, dan Raung. Gunung Arjuno – Welirang secara administrasi terdapat di 3 wilayah kabupaten, Kabupaten Malang, Mojokerto, dan Pasuruan dengan letak geografis pucak terdapat pada $7^{\circ} 40' - 7^{\circ} 53' \text{ LS } 112^{\circ} 31'7'' - 112^{\circ} 42'52''$ dan memiliki ketinggian masing-masing : G. Arjuno 3339m dpl., G. Welirang 3156m dpl. Kedua gunung api ini merupakan tipe Gunungapi strato tipe A

Kompleks G. Arjuno-Welirang mempunyai beberapa kerucut di puncaknya yaitu : Kerucut G. Arjuno (3339m dpl., kerucut tertua), Kerucut G. bakal (2960m dpl), Kerucut G. Kembar II (3126m dpl), Kerucut G. Kembar I (3030m dpl), dan Kerucut G. Welirang (3156m dpl). Kerucut-kerucut tersebut terbentuk akibat perpindahan titik erupsi yang membentuk kelurusan berarah tenggara-barat laut dan dikontrol oleh sesar normal. Selain kerucut-kerucut tersebut terdapat pula beberapa kerucut parasit yang merupakan hasil letusan samping pada tubuh Kompleks G. Arjuno-Welirang. Kerucut parasit tersebut adalah G. Ringgit (2477m dpl) di bagian timur laut, G. Pundak (1544m dpl) dan G. Butak (1207m dpl) di bagian utara, serta dua buah kerucut lainnya yaitu G. Wadon dan G. Princi yang terdapat pada tubuh bagian timur.

Batuan penyusun kompleks G. Arjuno-Welirang dihasilkan oleh tiga buah erupsi pusat dari G. Arjuno Tua, G. Arjuno Muda dan G. Welirang berupa aliran lava, aliran piroklastik, jatuhnya piroklastik dan lahar yang sebarannya ke arah utara dan barat (Berita Berkala Vulkanologi, Edisi Khusus, 1992, G. Arjuno -Welirang).

Hampir seluruh daerah Gunung Arjuno-Welirang merupakan batuan produk vulkanik Kuartar yang dapat dipisahkan berdasarkan pusat erupsinya. Beberapa produk gunungapi di daerah ini terdiri dari aliran lava dan piroklastik. Komponen satuan batuan serta struktur geologi daerah fokus penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan dijelaskan seperti dibawah ini.



Gambar 2.2 Komponen satuan batuan dan struktur geologi Komplek Gunung Arjuno-Welirang

a. Satuan Lava Anjasmara

Satuan ini tersusun oleh lava andesit basaltis dan breksi vulkanik. Lava andesit berwarna abu-abu gelap afanitik porfiritik, keras dan masif. Di beberapa daerah terlihat jelas struktur vesikular yang mencerminkan lava pada bagian atas, terdapat kekar berlembar (sheeting joint), tebal satuan ini lebih dari 1000 m dengan ciri topografi curam dengan bentuk dinding sesar yang cukup luas dengan bentuk radial

seperti rim kaldera. Batuan tersusun oleh plagioklas dan mineral mafik (olivin, piroksen) yang cukup banyak. Singkapan muncul di sepanjang jalan dari arah padusan ke arah kota Batu. Breksi vulkanik berwarna abu-abu gelap sampai kehitaman, menyudut, kompak dan keras, terdiri dari komponen lava basaltik berukuran lapili – bom tersusun oleh mineral plagioklas dan piroksen, matriks berwarna coklat kehitaman tersusun tufa kasar.

b. Lava Tua Arjuno-Welirang

Satuan ini tersebar di sekitar Gunung Ringgit, Gunung Lincing, di bagian utara sekitar Prigen dan juga tersingkap sedikit di bagian barat daerah Air Panas Coban. Karakteristik batuan berupa lava andesit–basaltis dengan tekstur porfiritik, keras dan tebalnya yaitu >1000 m. Mineral penyusun didominasi oleh mineral mafik (piroksen) dan plagioklas. Beberapa tempat berstruktur kekar berlembar. Satuan ini diduga sebagai tubuh tua dari kompleks Arjuno–Welirang yang masih tersingkap di permukaan.

c. Aliran Piroklastik Tua Arjuno–Welirang

Satuan ini tersingkap berupa aliran piroklastik berwarna abu-abu kecoklatan, terdiri dari komponen lava, scorea dan pumice berukuran lapili sampai bom, menyudut sampai menyudut tanggung, vesikular tertanam dalam matrik tufa pasir berwarna kecoklatan. Satuan ini diperkirakan merupakan produk eksplosif dari tubuh lava tua kompleks Arjuno-Welirang yang berumur Kuarter awal, hal tersebut berkaitan dengan munculnya pumice dan scorea yang merupakan material hasil eksplosif besar. Disamping itu pembentukan satuan ini diperkirakan berhubungan dengan runtuhnya tubuh Arjuno-Welirang yang membentuk struktur ring fracture.

d. Aliran Piroklastik Penanggungan

Satuan ini tersusun oleh aliran piroklastik berwarna abu-abu kecoklatan dengan komponen lava andesit produk Gunung Penanggungan, angular. Matrik batuan berupa tuf berwarna kecoklatan.

e. Erupsi Sampling

Satuan ini tersebar di tiga lokasi, masing-masing adalah lava produk Gunung Bulak, lava produk Gunung Pundak di bagian utara dan lava produk Gunung Tanggungan di bagian barat kompleks Arjuno–Welirang. Lava berkomposisi andesit – basaltik berwarna abu-abu tua – kehitaman, afanitik – porfiritik dengan mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan sedikit olivin. Produk samping ini terbentuk setelah pembentukan lava Arjuno-Welirang tua yang muncul melalui 13

zona struktur di bagian samping kompleks Arjuno–Welirang, memiliki ketinggian sampai 300 m dari lereng sampingnya.

f. Lava Welirang I

Lava basalt berwarna abu-abu kehitaman, porfiritik, masif, terdiri dari mineral plagioklas, piroksen, olivin dan mineral sekunder berupa mineral lempung dan oksida besi. Satuan ini diduga merupakan produk Sin-Arjuno Welirang yang terbentuk setelah terjadinya kolaps/subsiden pada batuan pra-Arjuno Welirang. Munculnya lava Welirang kemungkinan diakibatkan oleh terbentuknya struktur regional yang berarah barat-laut–tenggara yang memfasilitasi naiknya lava melalui zona tersebut ke permukaan. Struktur tersebut sejajar dengan munculnya pusat erupsi Gunung Kembar I, II dan Arjuno.

g. Aliran Piroklastik Welirang I

Satuan ini tersebar di bagian utara daerah survei, di sekitar Padusan, Pacet hingga Kenang di kaki Gunung Penanggungan. Satuan ini memiliki hubungan yang selaras dengan Lava Welirang I. Diperkirakan terbentuk sebagai akibat adanya letusan eksplosif yang juga membentuk ring fracture yang menghasilkan produk aliran piroklastik yang tersebar luas dengan jatuhnya piroklastik tipis. Aliran piroklastik berwarna abu-abu tua kecoklatan, keras, menyudut dengan komponen lava andesit – basal berukuran bongkah – lapili yang tertanam pada matrik tuf berukuran sedang berwarna kecoklatan. Satuan ini menindih lava Welirang dan aliran piroklastik tua Pra-Arjuno Welirang. Jatuhnya piroklastik tipis berwarna abu-abu tua, berukuran sedang tersingkap di daerah Claket menindih aliran piroklastik Welirang 1 dengan ketebalan <30 cm.

h. Lava Arjuno

Satuan ini menempati bagian tengah kompleks Arjuno–Welirang dengan penyebaran ke arah tenggara. Produk Arjuno terbentuk setelah terjadinya subsiden yang merupakan Sin-Arjuno Welirang. Batuan berkomposisi lava basalt, berwarna abu-abu kehitaman, afanitik – porfiritik, setempat terdapat struktur kekar berlembar. Mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan olivin serta mineral lempung sedikit oksida besi. Satuan ini mengalami aktifitas struktur yang lebih kuat dibanding satuan lainnya dengan ditunjukkan dengan terbentuknya longoran berarah tenggara dan timur laut.

i. Aliran Piroklastik Arjuno

Satuan tersebar di bagian tenggara daerah survei disekitar Tambaksari. Tersusun oleh aliran piroklastik produk Arjuno yang berwarna abu-abu

kecoklatan, dengan komponen lava basalt berukuran lapili – bom dan matrik tuf kecoklatan berukuran sedang. Satuan ini menindih secara selaras satuan lava Arjuno.

j. Lava Welirang II

Satuan ini menindih satuan lava Welirang I dengan pusat erupsi sama. Pada bagian puncak terbentuk kawah yang masih aktif dan terbagi menjadi dua lokasi. Kawah Jero berada di bagian puncak dan kawah Pluluh berada di tepian, hanya berjarak <500 m antara keduanya. Batuan berupa lava basalt dan aliran piroklastik. Pada masing-masing kawah terbentuk pengendapan belerang dalam jumlah yang banyak. Alterasi, solfatara dan fumarol ditemukan pada satuan ini. Lava Welirang berjenis basalt, tekstur porfiritik, berongga (*scoreous*) menunjukkan adanya proses pendinginan di permukaan dengan cepat dan banyak mengeluarkan gas. Lava ini berselang-seling dengan aliran piroklastik dimana tersingkap *charcoal* sebagai salah satu komponennya.

k. Lava Kembar II

Satuan ini berada diantara puncak Arjuno dan Welirang, terbentuk setelah terjadinya proses amblesan yang kemudian membentuk pola kesejajaran pusat erupsinya, salah satunya adalah Gunung Kembar II. Aliran lava mengalir ke bagian barat hingga daerah Cangar. Komposisi batuan berupa lava basalt berwarna abuabu, porfiritik dengan mineral penyusun berupa plagioklas, piroksen dan sedikit olivin.

l. Aliran Piroklastik Kembar II

Satuan ini penyebarannya kearah timur dari pusat erupsi Gunung kembar II. Mengisi bagian depresi pada elevasi yang lebih rendah akibat struktur Arjuno dan membentuk pada puncak Gunung Ringgit yang memiliki elevasi lebih tinggi.

m. Lava Kembar I

Penyebaran dari lava Kembar ke arah barat dan timur dari puncak erupsinya. Karakteristik batuan berupa lava andesit hornblen dengan presentasi mineral hornblen yang lebih banyak dari piroksen. Porfiritik dan terdiri dari mineral lava plagioklas, hornblen, piroksen yang tertanam dalam massa dasar gelas vulkanik. Vesikular akibat pelepasan gas di permukaan.

n. Aliran Piroklastik Kembar I

Satuan ini berada di bagian barat daya daerah survei dengan penyebaran di sekitar Sumber brantas ke arah Kota Batu dan muncul sedikit di bagian timur pusat erupsinya. Aliran piroklastik berwarna

coklat dengan komponen lava berukuran lapili – bom, matrik berupa abu vulkanik berwarna kehitaman. Air panas Cagar muncul melalui rongga dan rekahan dari satuan ini, menindih satuan aliran piroklastik pra-arjuno welirang dan lava Kembar II.

o. Lava Bakal

Satuan ini penyebarannya hanya sedikit. Volume lava yang dikeluarkan tidak menyebar luas hingga ke lereng bawah kompleks Arjuno–Welirang. Disamping itu aliran lavanya dibatasi oleh morfologi yang dibentuk oleh aliran piroklastik Kembar II. Satuan ini menindih lava Kembar II dan lava Arjuno.

Untuk struktur geologi daerah penelitian (seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2) dapat diklasifikasikan berdasarkan arah kelurusan pola strukturnya yaitu:

a. Sesar berarah Utara–Selatan

Beberapa sesar pada arah ini diwakili oleh Sesar Cagar, Sesar Puncung dan Sesar Claket, berupa kelurusan manifestasi, munculnya gawir sesar dan air terjun serta perbedaan ketinggian pada topografi yang cukup terjal.

b. Sesar berarah Baratlaut–Tenggara

Sesar ini diperkirakan sebagai pola struktur yang muncul berupa antitetik dari sesar utama dengan arah baratdaya–timurlaut sejajar pola Meratus. Sesar ini diwakili oleh Sesar Padusan, Sesar Kemiri, dan Sesar Bakal. Sesar Kemiri dan Sesar Claket diperkirakan membentuk suatu daerah graben yang bagian turunnya diisi oleh aliran piroklastik Welirang. Kenampakan di lapangan dicirikan oleh kelurusan air panas dan topografi yang terjal. Sesar-sesar ini kemungkinan mengontrol munculnya air panas di sekitar Padusan dan berpengaruh dalam pembentukan daerah impermeabel dalam sistem panas bumi Arjuno-Welirang.

c. Sesar berarah Baratdaya–Timurlaut

Sesar ini diperkirakan sebagai sesar utama yang mempengaruhi munculnya kompleks gunungapi Arjuno-Welirang. Sejajar dengan arah sesar *basement* yang berpola Meratus. Memiliki kecenderungan berasosiasi terhadap munculnya Gunung Penanggungan yang menerus ke arah lumpur Sidoarjo. Sesar ini diwakili oleh Sesar Welirang, Sesar Kembar dan Sesar Bulak. Kenampakan di lapangan berupa gawir yang membentuk air terjun.

d. Sesar berarah Barat–Timur.

Sesar ini diwakili oleh Sesar Ledug dan Sesar Ringit. Penarikan sesar didasarkan pada kelurusan topografi dan citra landsat.

e. Rim Kaldera Anjasmoro

Sesar ini berjenis sesar normal yang membentuk gawir curam dan melingkar. Kenampakan di lapangan dapat dilihat jelas dari arah jalan menuju Cagar. Diperkirakan merupakan bentukan dari sisa kaldera tua yang terbentuk akibat aktivitas vulkano tektonik di kompleks Anjasmoro.

f. Sektor amblasan (*collapse*)

Sesar yang terbentuk berupa sesar normal ditunjukkan dengan bentukan yang khas setengah melingkar dengan arah bukaan ke tenggara dan timurlaut. Sesar-sesar ini ditunjukkan oleh Sesar Arjuno. Disamping itu sektor amblasan ditarik berdasarkan kelurusan dari tubuh tua Gunung Arjuno-Welirang dengan daerah bukaan ke arah baratdaya. Amblasnya daerah ini kemungkinan diakibatkan oleh aktivitas vulkanik Gunung Arjuno-Welirang yang memuntahkan material vulkaniknya sehingga terjadi kekosongan dan memicu munculnya produk vulkanik baru.

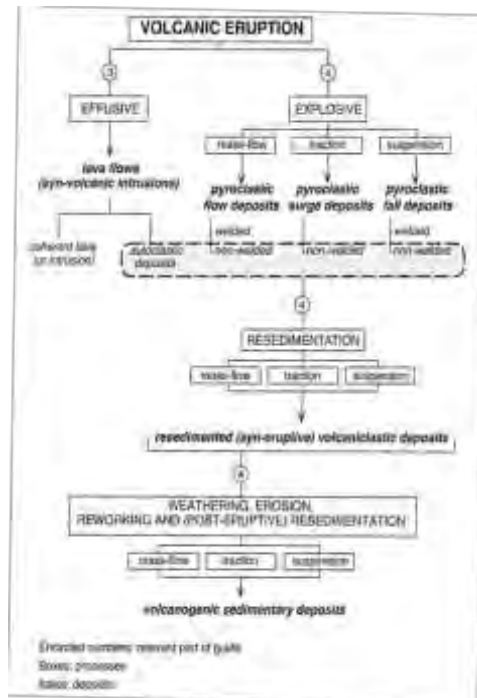
2.2 Batuan Vulkanik

Batuan vulkanik atau batuan gunung api adalah batuan beku yang terbentuk sebagai hasil kegiatan gunung api, baik secara langsung maupun tidak langsung. Batuan gunung api yang terbentuk secara langsung dari erupsi dan membantu secara insitu tersebut sering diistilahkan batuan gunung api primer (*primary volcanic rock*). Sebaliknya, bahan gunung api yang setelah mengendap atau membantu kemudian mrngalami perombakan kembali dinamakan batuan gunung api sekunder. Proses perombakan tersebut dilakukan tenaga dar luar (*exogenic process*), yakni air, angin, es melalui proses pelapukan, erosi, transportasi, dan pengendapan kembali.

Batuan gunung api pada prinsipnya adalah hasil pendinginan yang sangat cepat dari magma pada waktu dierupsikan sehingga terbentuk batuan beku luar, batuan instrusi dangkal, dan batuan klastika gunung api, khususnya batuan piroklastika. Pendinginan dan pembekuan magma yang sangat cepat dari magma itu menyebabkan sebagian unsur dan mineral tidak sempat mengkristal tetapi membentuk bahan amorf berupa gelas gunung api (*volcanic glass*).

Berdasarkan sifat kegiatan atau mekanisme keluarnya magma ke permukaan bumi, erupsi gunung api dibagi menjadi 3 macam, yakni :

- a. Erupsi lelehan (erupsi efusiva) adalah keluarnya magma secara meleleh. Hasil kegiatan berupa batuan beku luar yang dapat membentuk aliran lava atau kubah lava.
- b. Erupsi letusan (erupsi eksplosiva) adalah keluarnya magma secara meletus. Erupsi letusan ini menghasilkan bahan klastika (bahan fragmental, hamburan, pecahan, kepingan, atau serpihan) gunung api dengan ukuran butir dari halus sampai kasar.
- c. Kombinasi erupsi efusiva dan eksplosiva adalah erupsi berselang-seling antara efusiva dan eksplosiva. Kegiatan itu biasanya ditengahi oleh fase istirahat yang beragam mulai dari sangat singkat atau hanya dalam beberapa tahun sampai sangat lama dalam hitungan ratusan tahun bahkan puluhan ribu tahun. Didalam satu periode erupsi jarang sekali terjadi selang-seling



Gambar 2.3 Bagan alir batuan beku vulkaniklastik (McPhie, dkk., 1993)

Piroklastik atau *pyroclastics* secara etimologi berasal dari kata *pyro* (Bahasa Yunani yang berarti api) dan *clastic* yang berarti fragmen atau pecahan. Batuan piroklastik dihasilkan oleh serangkaian proses yang berkaitan dengan letusan gunung api. Material erupsi dari gunung api tersebut terendapkan dan terbatukan/terkonsolidasikan sebelum mengalami transportasi (*reworked*) oleh air atau es (William, 1982). Menurut McPhie (1993), batuan piroklastik adalah batuan yang tersusun oleh material-material yang berasal dari hasil erupsi gunung api yang eksplosif, dan diendapkan dengan proses-proses vulkanik primer.

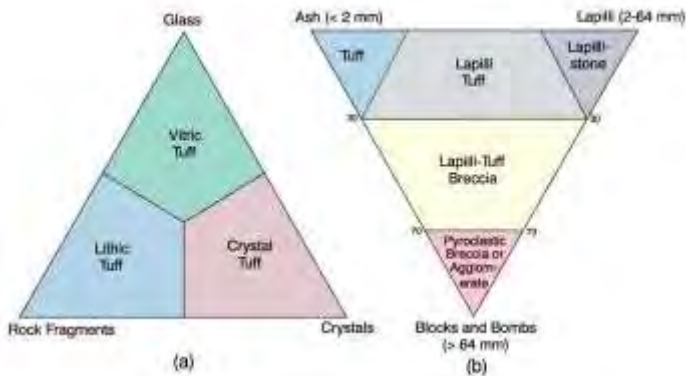
Kelompok batuan ini menjadi penting untuk dipelajari mengingat kondisi geologi Indonesia yang dilalui oleh 2 jalur pembentukan gunung api mediterania & pasifik, sehingga batuan ini sering dijumpai di Indonesia, khususnya pada daerah vulkanik aktif.

Piroklas dan batuan piroklastik dikelompokkan berdasarkan ukuran butirnya, yaitu :

Tabel 2.1 Ukuran butir Piroklas dan Batuan Piroklastik

Ukuran butir	Piroklas	Batuan piroklastik
> 64 mm	Bombs	Agglomerate
	Blocks	Pyroclastic Breccia
64 – 2 mm	Lapili	Lapili tuff / Lapili stone
< 2 mm	Ash grain	Tuff / Ash tuff

Klasifikasi batuan piroklastik terbagi atas dua, yaitu secara dekriptif (non-genetis) dan secara genetis (McPhie, 1993). Klasifikasi secara dekriptif mengelompokkan batuan piroklastik berdasarkan bentuk dan karakteristik batuan yang dapat diketahui dengan pengamatan langsung tetapi tidak harus mengetahui kenampakan singkapan batuan tersebut. Klasifikasi secara genetis harus melihat proses petrogenesa batuan meliputi kenampakan endapan piroklastik, geometri secara keseluruhan di lapangan, struktur primer dan sekunder, serta melihat deskripsi endapan secara rinci sebelum dapat ditentukan jenis endapan piroklastiknya.



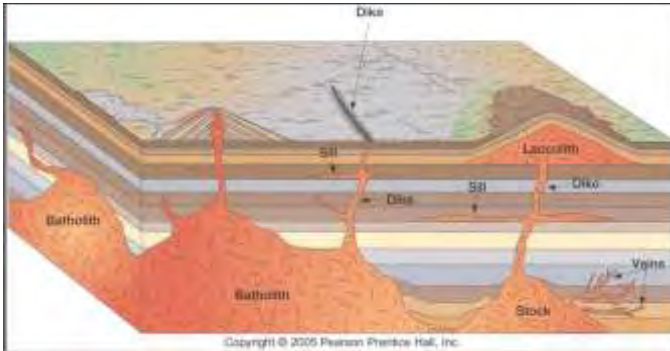
Gambar 2.4 Klasifikasi non-genetik batuan piroklastik yang didasarkan pada: (a) komposisi batuan, dan (b) ukuran material penyusunnya (Fisher, 1984)

Sedangkan hasil dari erupsi efusiva dalam arti luas adalah kerucut *spatter* (sebagai akumulasi lava mancur dan percikan lava pijar), aliran lava, kubah lava, sumbat lava, retas, sill, kubah lava permukaan, dan intrusi dangkal.

Secara umum, batuan beku saat membeku di bawah permukaan akan menghasilkan bentukan-bentukan tubuh batuan beku yang dibedakan berdasarkan geometri dan hubungan dengan batuan sekitar yang diterobosnya, antara lain :

- a. *Batholith* merupakan tubuh batuan beku intrusif (plutonik) dengan ukuran yang sangat besar (dapat mempunyai luas lebih dari 100 km^2), terbentuk jauh di bawah permukaan, dan umumnya mempunyai bentuk tidak beraturan dan batas bawah yang tidak jelas. *Batholith* umumnya terbentuk dari batuan beku *felsic* atau *intermediate*, contohnya : granit, monzonit kuarsa, atau diorit.
- b. *Stock* merupakan batuan beku intrusif dengan bentuk tidak beraturan seperti *batholith*, namun dengan ukuran yang lebih kecil (kurang dari 10 km^2). *Stock* dapat merupakan penyerta tubuh *batholith* ataupun bagian atas dari *batholith*.
- c. *Dike* (gang/korok) merupakan tubuh batuan beku intrusi yang berbentuk tabular yang memotong lapisan batuan di sekitarnya.

- d. *Sill* merupakan tubuh batuan beku intrusi berbentuk tabular dengan kedudukan paralel/sejajar dengan lapisan batuan di sekitarnya.
- e. *Laccolith* merupakan tubuh batuan beku intrusi yang bentuknya cembung ke arah atas di bagian atas, dan rata di bagian bawah yang paralel dengan lapisan batuan di sekitarnya. Lakolit terbentuk dari intrusi magma yang kental.
- f. *Lopolith* merupakan tubuh batuan beku intrusi yang bentuknya cembung ke arah bawah, dengan kedudukan paralel dengan lapisan batuan di sekitarnya. *Lopolith* terbentuk dari intrusi magma yang tidak kental.
- g. *Volcanic neck* merupakan tubuh batuan beku yang berbentuk silindris ataupun tak beraturan hasil dari pembekuan pipa gunung api yang menghubungkan kepundan magma dengan kawah. Apabila gunung api mengalami erosi, *volcanic neck* akan tersisa karena sifatnya yang lebih resisten dan menghasilkan bentukan positif dari morfologi sekitarnya.



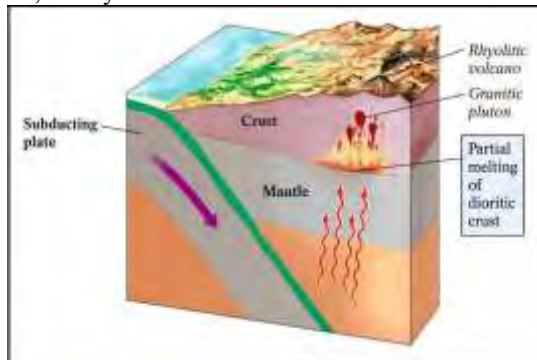
Gambar 2.5 Penggambaran bentuk batuan beku intrusif

Dalam batuan vulkanik sendiri, saat pergerakan magma tidak mampu keluar ke permukaan, maka magma akan mendingin dan membeku membentuk batuan beku intrusi/terobosan dangkal (dekat permukaan) di dalam tubuh batuan gunung api dan sering disebut sub-volcanic intrusion. Berdasarkan pengertian tersebut, apabila melihat proses pembentukan batuan beku, maka yang termasuk intrusi dangkal ini seperti : *sill*, *dike*, *laccolith*, *lapolith*, dan *volcanic neck*.

2.3 Komposisi Mineral Batuan Vulkanik

Untuk membantu proses deskripsi batuan vulkanik perlu adanya referensi mengenai keterdapat mineral – mineral felsik hingga mafik pada tubuh batuan. Batuan beku dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok berdasarkan komposisi mineral dan komposisi kimia yang dominan terkandung. Hal ini dipengaruhi oleh proses diferensiasi magma yang menghasilkan magma dengan komposisi berbeda-beda, sehingga produk batuan yang dihasilkan dari magma bersifat felsik sampai mafik.

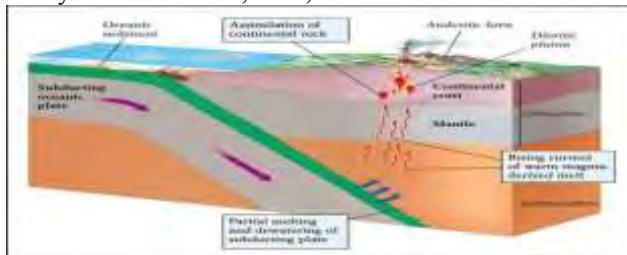
- a. Batuan beku felsik adalah batuan beku dimana komposisi mineralnya di dominasi mineral-mineral felsik yang bersifat asam yang umumnya mempunyai kandungan silika lebih dari 66%, mengandung kurang dari 30% mineral mafik, mempunyai warna yang cerah dengan indeks warna antara 10%-40%. Mineral utama dalam batan beku felsik adalah ortoklas, kuarsa, plagioklas, dan muskovit. Contoh batuannya adalah granit, riolit, dan syenit.



Gambar 2.6 Contoh lokasi pembentukan batuan beku felsik (Schmincke, 2004)

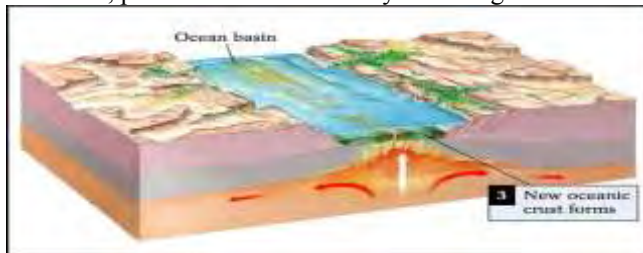
- b. Batuan beku intermediate adalah batuan beku yang komposisi mineralnya di dominasi mineral-mineral yang mempunyai sifat lebih basa dari mineral-mineral felsik, umumnya mempunyai kandungan silika 52%-66% dengan kandungan mineral mafik 30%-60%, mempunyai warna yang sedikit gelap dengan indeks warna 40%-70%. Mineral utama dalam batuan beku ini adalah

feldspatoid, plagioklas, hornblenda, dan biotit. Contoh batumannya adalah andesit, dasit, dan monzonit.



Gambar 2.7 Contoh lokasi pembentukan batuan beku *intermediate* (Schmincke, 2004)

- c. Batuan beku mafik adalah batuan beku yang mempunyai komposisi mineralnya didominasi mineral-mineral mafik yang bersifat basa, mempunyai kandungan silika 45%-52%, mempunyai warna yang gelap dengan indeks warna 70%-90%, mineral utama dalam batuan beku mafik ini adalah biotit, hornblende, piroksen. Contoh batumannya adalah gabro dan basal.



Gambar 2.8 Contoh lokasi pembentukan batuan beku mafik (Schmincke, 2004)

- d. Batuan beku ultramafik adalah batuan beku yang mempunyai komposisi mineral didominasi oleh mineral-mineral yang bersifat ultrabasa dengan kandungan-kandungan silika kurang dari 45%, mempunyai warna yang gelap dengan indeks warna diatas 90%, mineral utama dalam batuan beku ultramafik adalah piroksen dan olivin. Contoh batumannya adalah dunit dan peridotit.

2.4 Karakteristik Fisik Batuan Vulkanik

2.4.1 Densitas Batuan Vulkanik

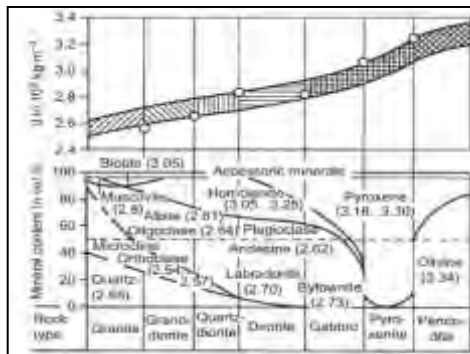
Densitas merupakan salah satu karakter fisis batuan yang dapat berubah secara signifikan terhadap perubahan tipe batuan akibat mineral dan porositas yang dimiliki batuan tersebut. Densitas (ρ) merupakan perbandingan massa (m) batuan per satuan unit volume (V) :

$$\rho = m/V, \text{ dengan satuan gram/cc} \dots\dots\dots (2.1)$$

Sedangkan untuk mengetahui densitas *bulk* ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilainya diantaranya komposisi mineral (densitas mineral dan fraksi volume); porositas (pori dan *fracture*) dan porositas fluida pori batuan. Untuk mendapatkan nilai densitas *bulk* batuan digunakan persamaan dibawah ini:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i \dots\dots\dots (2.2)$$

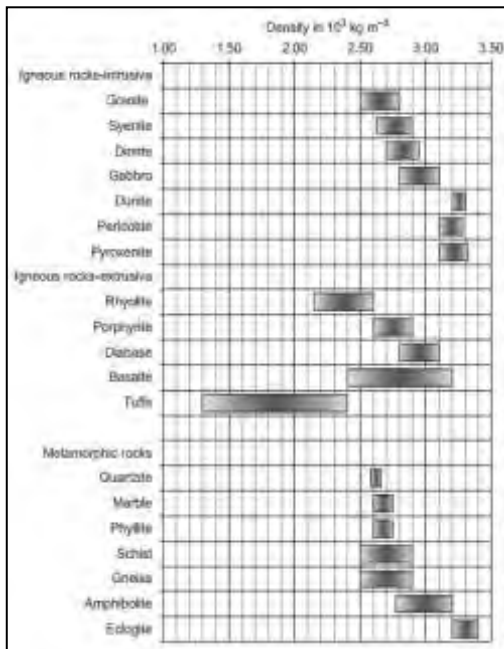
Jika diklasifikasikan berdasarkan jenis batuan, nilai densitas batuan beku sangat dipengaruhi oleh kandungan pH mineralnya. Semakin tinggi pH mineral batuannya, maka nilai densitasnya akan semakin besar. Maka, densitas batuan beku akan meningkat dari batuan beku yang memiliki komposisi mineral felsik (asam) menuju batuan beku yang memiliki komposisi mineral mafik (basa). Gambar 2.9 menjelaskan secara detail grafik hubungan komposisi mineral dengan nilai densitas dari batuan beku.



Gambar 2.9 Korelasi antara komposisi mineral dan densitas untuk batuan beku menurut Dortman (1976) (Schoen, 2011)

Setiap batuan memiliki rentang terhadap nilai densitasnya masing-masing. Jika dibandingkan dengan batuan sedimen, rentang nilai

densitas batuan beku cenderung kecil. Hal ini disebabkan variasi nilai densitas yang ditimbulkan sebagian besar diakibatkan dari pengaruh mineralnya dan hanya sedikit pengaruh dari volume *fracture* maupun pori di batuan. Gambar 2.10 akan memaparkan rata-rata nilai densitas dari beberapa jenis batuan beku.



Gambar 2.10 Rentang nilai densitas rata-rata batuan beku dan batuan metamorf (Schoen, 2011)

2.4.2 Kecepatan Vp Batuan Vulkanik

Terdapat dua jenis kecepatan gelombang yang memiliki peran penting pada metode seismik, yakni kecepatan gelombang P (*compressional wave*) dan kecepatan gelombang S (*shear wave*). Persamaan gelombang elastik sendiri dapat ditulis sebagai berikut :

$$V = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana M = Modulus elastik dan ρ = densitas

Persamaan gelombang P dapat diturunkan sebagai fungsi dari sifat elastik :

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana V_p = kecepatan gelombang P (m/s);

K = modulus bulk;

μ = modulus geser; dan

ρ = densitas.

Sedangkan untuk kecepatan gelombang persamaanya yakni :

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Persamaan yang menyatakan hubungan V_p dan densitas yang paling umum digunakan adalah persamaan gardner, karena persamaan ini cocok digunakan untuk batuan sedimen dan kurang cocok untuk digunakan untuk batuan vulkanik ataupun metamorf. Berikut ini adalah beberapa persamaan yang memeperlihatkan hubungan V_p dan densitas:

Gardner et al. (1974) untuk batuan sedimen:

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 1.74 V_p^{0.25} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana persamaan ini berlaku untuk interval kecepatan $1.5 < V_p < 6.1$.

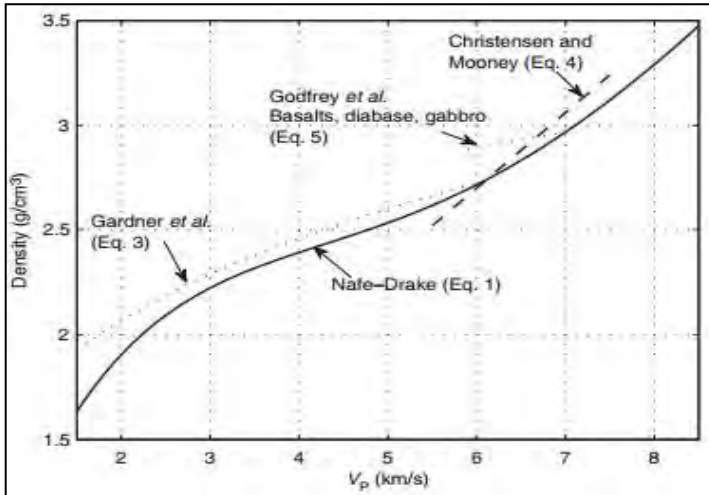
Christensen dan Mooney (1995) untuk batuan kristalin pada kedalaman 10 km dan range kecepatan $5.5 < V_p < 7.5$:

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 0.541 + 0.36 V_p \dots\dots\dots (2.7)$$

Godfrey et al (1997). Persamaan ini berlaku untuk batuan basalt, diabas, dan gabbro yang didasarkan oleh data yang dilaporkan oleh Christensen dan mooney (1995)

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 2.4372 + 0.076 V_p \dots\dots\dots (2.8)$$

Persamaan ini juga berlaku untuk batuan kerak benua pada kedalaman 10 km dengan rentang kecepatan $5.9 < V_p < 7.1$



Gambar 2.11 Grafik Perbandingan hubungan V_p dan density brocher terhadap persamaan gardner, godfrey, Christensen, and nafe-drake pada batuan kerak benua

Brocher (2005):

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 1.6612V_p \left(\frac{km}{s} \right) - 0.0671V_p^2 + 0.0671V_p^3 - 0.0043V_p^4 + 0.000106V_p^5 \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan ini berlaku untuk interval kecepatan $1.5 < V_p < 8.5$ km/s dan berlaku juga untuk seluruh batuan kerak benua, kecuali batuan benua ultra mafic dan batuan karbonat. Brocher juga membuat persamaan terbalik dari V_p -densitas sebagai berikut:

$$V_p (km/s) = 39.128\rho(g/cm^3) - 63.064\rho^2 + 37.083\rho^3 - 9.181\rho^4 + 0.822\rho^5 \dots\dots\dots (2.10)$$

2.4. 3 Atenuasi Gelombang Seismik pada Batuan Vulkanik

Pada penyebaran gelombang di Bumi diketahui bahwa idealnya bumi memiliki sifat murni elastis, sehingga gelombang seismik mengalami refleksi, refraksi dan transmisi energi pada batas kontrol amplitudo dari pulsa seismik. Bumi sebenarnya tidak elastis sempurna, dan propagasi gelombang mengalami pelemahan seiring dengan berjalannya waktu karena berbagai mekanisme pelepasan energi (Lay dan Wallace, 1995).

Pengaruh atenuasi terhadap sinyal seismik dapat dilihat pada penurunan amplitudo dan melebarnya sinyal (panjang gelombang). Hal ini menunjukkan bahwa atenuasi merupakan gabungan antara pengurangan energi dan penyerapan frekuensi secara simultan, karena medium yang dilewati gelombang seismic memiliki tingkat redaman yang berbeda-beda maka penyerapan frekuensi oleh medium tersebut tidak sama. Perambatan gelombang pada medium yang homogen, yakni :

$$A(x) = A(x_0) \cdot \frac{x_0^n}{x} \cdot \exp[-\alpha(x - x_0)] \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana :

$A(x)$ = amplitudo pada jarak x

$A(x_0)$ = amplitudo pada jarak x_0

$\left(\frac{x}{x_0}\right)^n$ = amplitudo yang berkurang akibat perbedaan geometri

$\exp[-\alpha(x - x_0)]$ = amplitudo divergen yang tergantung pada geometri perambatan gelombang

Dengan berbagai penurunan dari persamaan awal amplitudo gelombang diatas, diperoleh persamaan koefisien atenuasi α , sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot 20 \cdot \log \left(\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana α = koefisien atenuasi (dalam dB m^{-1})

Pada berbagai kasus, pengukuran sifat-sifat atenuasi dapat berupa faktor kualitas Q (Knopoff, 1964) dan inversnya Q^{-1} yang dapat disebut sebagai faktor dispersi sebagai berikut :

$$Q^{-1} = \alpha \cdot \frac{v}{\pi f} \dots\dots\dots (2.13)$$

Sebagai sifat intrinsik, batuan Q adalah perbandingan antara energy yang tersimpan dan energy yang terdispasi. Untuk material yang *low-loss* (dalam hal ini sebagian besar terjadi pada semua jenis batuan) hubungan persamaan dari sifat – sifat atenuasi yang berbeda dari α , δ , dan Q^{-1} apabila di persamaan menjadi :

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \alpha \cdot \frac{v}{\pi f} \dots\dots\dots (2.14)$$

Sehingga dapat disimpulkan α adalah amplitudo gesekan yang hilang per satuan jarak, sedangkan Q^{-1} adalah amplitudo gesekan yang hilang per panjang gelombang atau per osilasi.

Secara umum, sifat-sifat atenuasi batuan-batuan yang alami secara signifikan lebih tinggi daripada sifat-sifat yang dimiliki oleh mineral. Ini menunjukkan bahwa atenuasi secara linier dikontrol oleh kerusakan, ketidakhomogenan, struktur dan ikatan sifat-sifat batuan.

Tabel 2.2 Koefisien atenuasi (pada frekuensi 50 Hz) dan velocity berbagai jenis batuan (After Ellis and Singer, 2007)

Rock	Velocity V_p in km s^{-1}	Attenuation α_p in m^{-1}
Granite	5.0–5.1	$(0.21–0.38) \cdot 10^{-3}$
Basalt	5.5	$0.41 \cdot 10^{-3}$
Diorite	5.8	$0.2 \cdot 10^{-3}$
Limestone	5.9–6.0	$(0.04–0.37) \cdot 10^{-3}$
Sandstone	4.0–4.3	$(0.7–1.8) \cdot 10^{-3}$
Shale	2.15–3.3	$(0.68–2.32) \cdot 10^{-3}$

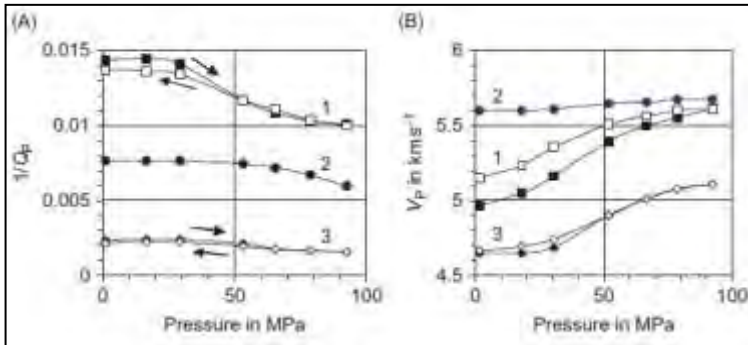
Koefisien atenuasi merupakan parameter yang bergantung pada frekuensi. Atenuasi meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi (efek *low-pass filter*). Menurut Berzon (1997), nilai koefisien atenuasi proporsional dengan frekuensi ($\alpha \propto f$) dan menyatakan beberapa nilai sebagai berikut :

- $\alpha \approx 10^{-7} - 10^{-6} \cdot f$ untuk inti dan mantel bumi
- $\alpha \approx 10^{-5} \cdot f$ untuk batuan beku unweathered
- $\alpha \approx 10^{-3} \cdot f$ untuk *unconsolidated dry rock* yang berada di permukaan

Nilai atenuasi berkurang dengan meningkatnya nilai sementasi dan kedalaman batuan. Dari perbandingan umum tersebut dapat digarisbawahi kecepatan dan atenuasi batuan bergantung pada berbagai faktor seperti porositas, tekanan, dan konsolidasi.

Untuk batuan beku, *fracture* dan *microcracks* merupakan faktor yang penting untuk karakterisasi sifat elastik batuan. Pada gambar 2.12 ada beberapa kondisi yang bisa dijelaskan. Batuan yang diberikan tekanan kecil berpengaruh kecil pada perubahan *velocity* maupun atenuasi (untuk sampel 2), begitupun sebaliknya semakin tinggi tekanan yang diberikan pada batuan, nilai *velocity* dan atenuasi akan mengalami perubahan yang cukup signifikan. Kemudian perubahan nilai atenuasi

akibat perubahan gesekan (yang dapat mengakibatkan *crack/fracture*) menunjukkan, lebih terlihat perbedaannya secara signifikan dibandingkan dengan perubahan *velocity*-nya pada sampel yang sama. Selain itu, hubungan anatar atenuasi (dan *velocity*) menunjukkan ketidak linieran dari grafik tersebut.



Gambar 2.1 Hubungan antara Q^{-1} dengan velocity V_p pada tekanan hidrostatik, frekuensi=32 Hz (Merkulova et al, 1972). 1-quartz (*thermal cracked*), 2-quartz, 3-granit

2.4.4 Resistivitas Batuan Vulkanik

Pada tahun 1827, George Ohm telah mendefinisikan hubungan antara arus listrik yang mengalir di sebuah kawat dengan beda tegangan, yaitu:

$$V = IR \dots\dots\dots (2.15)$$

Ohm telah menemukan bahwa arus, I , sebanding dengan beda tegangan, V , untuk material *ohmic*. Konstanta hubungan sebanding ini disebut resistansi material dengan satuan volt/ampere, atau ohm (Daud, 2007).

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (2.16)$$

Jika ditinjau suatu silinder dengan panjang L , luas penampang A , dan resistansi R , maka dapat di rumuskan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (2.17)$$

Di mana secara fisis rumus tersebut dapat di artikan jika panjang silinder konduktor (L) dinaikkan, maka resistansi akan meningkat, dan apabila diameter silinder konduktor diturunkan yang berarti luas penampang (A)

berkurang maka resistansi juga meningkat. Dimana ρ adalah resistivitas (tahanan jenis) dalam $\Omega.m$. Sedangkan menurut hukum Ohm, resistansi R dirumuskan (2.16) Sehingga didapatkan nilai resistivitas (ρ) :

$$\rho = \frac{VA}{IL} \dots\dots\dots (2.18)$$

adapun sifat konduktivitas (σ) batuan yang merupakan kebalikan dari resistivitas (ρ) dengan satuan ohms/m.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{IL}{VA} = \frac{J}{E} \dots\dots\dots (2.19)$$

Untuk medium yang kontinu, maka Hukum Ohm dapat dituliskan sebagai $J = \sigma E$. Di mana J adalah rapat arus (ampere/m^2) dan E adalah medan listrik (volt/m). Arus listrik akan mengalir pada medium sebagai pembawa muatan yang bergerak di bawah pengaruh medan listrik (E).

Arus listrik akan mengalir pada medium sebagai pembawa muatan yang bergerak di bawah pengaruh medan listrik (E). Dengan n = banyak pembawa muatan persatuan volume

q = muatan pada setiap pembawa

Jika ada medan magnet yang mengenai pembawa muatan, maka pembawa muatan ini akan bergerak memiliki kecepatan rata-rata, v , dan memiliki mobilitas μ , yang merupakan kecepatan persatuan medan listrik

$$\mu = \frac{v}{E} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan definisi arus,

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{nqAv\Delta t}{\Delta t} = nqAv \dots\dots\dots (2.21)$$

Rapat muatan, $J = \frac{I}{A} = nqv = nq\mu E$

Dengan $J = \sigma E$

Maka

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \dots\dots\dots (2.22)$$

Material yang memiliki resistivitas rendah akan memiliki banyak pembawa muatan dan memiliki mobilitas yang tinggi. Aliran arus listrik di dalam batuan dan mineral dapat terjadi jika batuan atau mineral mempunyai banyak elektron bebas sehingga arus listrik di alirkan dalam batuan atau mineral oleh elektron-elektron bebas tersebut. Aliran listrik ini juga di pengaruhi oleh sifat atau karakteristik masing-masing batuan yang di lewatinya. Salah satu sifat atau karakteristik batuan tersebut adalah *resistivity* (tahanan jenis) yang menunjukkan kemampuan bahan

tersebut untuk menghantarkan arus listrik. Semakin besar nilai resistivitas suatu bahan maka semakin sulit bahan tersebut menghantarkan arus listrik, begitu pula sebaliknya. Resistivitas memiliki pengertian yang berbeda dengan resistansi (hambatan), dimana resistansi tidak hanya bergantung pada bahan tetapi juga bergantung pada faktor geometri atau bentuk bahan tersebut, sedangkan resistivitas tidak bergantung pada faktor geometri.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilai resistivitas (tahanan jenis) dari suatu batuan yaitu:

1. Kandungan air

Semakin besar kandungan air yang terdapat dalam batuan, semakin kecil nilai resistivitas tersebut.

2. Tekstur Batuan

Tekstur batuan terkait dengan ukuran, bentuk, dan susunan batuan (struktur dan pengepakan batuan saat kompaksi). Porositas batuan dipengaruhi oleh tekstur batuan, namun besar kecilnya porositas bukan faktor yang menentukan nilai tahanan-jenis. Faktor yang dapat mempengaruhi perubahan tahanan-jenisnya yaitu fluida yang mengisi pori-pori atau ruang kosong tersebut.

3. Jenis Batuan

Setiap batuan memiliki tingkatan tahanan-jenis yang berbeda, namun beberapa tingkatan suatu jenis batuan ada juga yang masuk ke dalam tingkatan batuan lainnya (overlapping range). Hal ini yang menyebabkan sulit membedakan jenis batuan berdasarkan nilai tahanan jenisnya, kecuali ada suatu data penunjang yang bisa membantu untuk menggambarkan litologi bawah-permukaan seperti data geologi.

4. Porositas dan Permeabilitas

Porositas merupakan persentasi dari volume fluida dalam pori dengan volume total batuan. Sedangkan permeabilitas adalah kemampuan batuan untuk meneruskan fluida dan ion-ion

5. Mineral Lempung

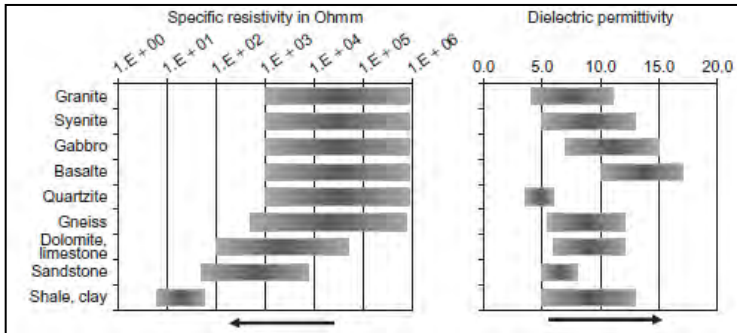
Semakin tinggi kandungan lempung mengakibatkan nilai tahanan jenis menjadi rendah. Faktor alamiah sangat mempengaruhi kondisi batuan terutama pada proses pelapukan.

6. Salinitas

Kadar garam yang tinggi dalam suatu fluida menyebabkan nilai tahanan jenis lebih rendah dibandingkan tahanan-jenis pada lempung.

Pada gambar 2.13 ditampilkan nilai rata-rata spesifik resistivitas dan nilai relaiif permitivitas beberapa jenis batuan. Pengaruh

yang dominan pada pori batuan yang terisi air menghasilkan nilai rentang resistivitas yang cukup berbeda dari tiap batuan. Dari gambar tersebut dijelaskan pengaruh dari pori dan fracture yang terisi air, dimana nilai resistivity akan menurun dengan meningkatnya porositas dan fracture pada batuan, sedangkan nilai permitivitas meningkat seiring dengan meningkatnya porositas dan fracture pada batuan.



Gambar 2.2 Nilai rata-rata untuk resistivitas elektrik dan permitivitas dielektrik pada tipe-tipe batuan, penunjuk panah menunjukkan efek dari pori dan fracture yang terisi air (Schoen, 2011)

Sebagian besar batuan yang memiliki mineral silikat dan karbonat memiliki nilai resistivitas spesifik yang tinggi sekitar lebih dari 10^9 ohm m. Mineral yang konduktif adalah sulfida dan oksida yang jarang ditemukan di lempeng kerak bumi. Namun kelompok konduktif yang paling penting ialah *graphite*. Dibawah ini ditampilkan beberapa spesifikasi resistivitas beberapa mineral yang ditemukan di batuan.

Untuk batuan beku ataupun vulkanik, mineral dan *fracture* memiliki pengaruh penting dari nilai resistivitas karena pori-pori batuan yang dimiliki cenderung sedikit dan kecil sehingga tidak diperhitungkan. Sehingga nilai resistivitas dari tiap tipe mineral sangat memengaruhi dari resistivitas batuan vulkanik.

Tabel 2.3 Nilai resistivitas dan permtivitas pada beberapa tipe mineral

Mineral	R ohm m (O)	ε_r (O)	ε_r (K)	Mineral	R ohm m (O)	ε_r (O)	ε_r (K)
Silicates				Sulfates			
Quartz	$2.0 \cdot 10^{14}$	4.5	4.2–5.9	Anhydrite	$1.0 \cdot 10^9$	6.5	
Amphibole, Hornblende	$4.8 \cdot 10^{10}$	8.0		Gypsum	$1.05 \cdot 10^{11}$	6.4	5.0–11.5
Microcline	$1.8 \cdot 10^{11}$	5.48		Apatite	$8.3 \cdot 10^{11}$	11.7	7.4–10.5
Orthoclase	$1.4 \cdot 10^{12}$	5.6		Barite	$1.2 \cdot 10^7$	10.0	7.0–12.2
Albite	$4.8 \cdot 10^6$	6.95	5.3–5.5	Halides			
Anorthite	$7.7 \cdot 10^9$	6.9	7.0–7.2	Halite	$5.0 \cdot 10^{13}$	5.9	5.7–6.2
Labradorite	$6.3 \cdot 10^6$	5.87		Sylvite			4.4–6.2
Muscovite	$2.2 \cdot 10^{12}$	7.6	6.2–8.0	Fluorite	$7.7 \cdot 10^{13}$	6.76	6.79
Biotite	$8.3 \cdot 10^{10}$	6.3	6.2–9.3	Oxides, sulfides			
Chlorite	$1.6 \cdot 10^9$	9.0		Hematite	$1.0 \cdot 10^2$	25.0	25.0
Kaolinite	$3.2 \cdot 10^7$	11.8		Magnetite	$1.0 \cdot 10^{-4}$		
Carbonates				Pyrite	$1.0 \cdot 10^{-3}$		33.7–81.0
Calcite	$9.0 \cdot 10^{13}$	6.35	7.8–8.5	Galena	$1.0 \cdot 10^{-3}$		17.9
Dolomite	$4.3 \cdot 10^{13}$	7.46	6.8–8.0	Sphalerite	$2.6 \cdot 10^{11}$	7.5	
Aragonite	$3.4 \cdot 10^{12}$	8.67					
Siderite	$8.3 \cdot 10^9$	9.3		Graphite	$1.4 \cdot 10^{-5}$		

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

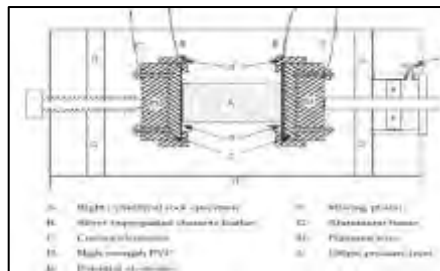
3.1 Peralatan dan Lokasi Penelitian

3.1.1 Peralatan Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini digunakan beberapa peralatan utama untuk pengukuran di laboratorium dan peralatan penunjang yang digunakan untuk pengambilan sampel di lapangan. Peralatan utama terdiri dari peralatan pengukuran densitas, peralatan pengukuran resistivitas, serta peralatan pengukuran velocity dan atenuasi.

Untuk peralatan pengukuran densitas diantaranya dibutuhkan sebuah neraca dan sebuah baker glass. Untuk peralatan pengukuran resistivitas diantara dibutuhkan seperangkat alat *resistivitymeter*, 2 buah aki 12 Volt, dan 4 buah elektroda yang berfungsi menyambungkan listrik dari alat resistivitymeter ke sampel batuan. Untuk peralatan pengukuran kecepatan V_p dan atenuasi dibutuhkan alat yang sama, yakni seperangkat *ultrasonic oscilloscope* yang terdiri dari *digital monitor*, *transducer*, dan *receiver*. Selain itu ada beberapa peralatan yang digunakan untuk mempersiapkan sampel siap ukur, diantaranya bor tangan untuk membuat *core* sampel batuan dan oven untuk mengeringkan sampel batuan karena kondisi sampel yang diharapkan adalah *dry rock*.

Peralatan penunjang lainnya yang dibutuhkan di lapangan untuk mengambil sampel diantaranya palu geologi, GPS, kompas geologi, tempat penyimpanan sampel, peta geologi, dan peta topografi lokasi pengukuran.



Gambar 3.1 Desain elektroda resistivitymeter untuk pengukuran resistivitas secara radial (Abousrafa, E.M., 2013)



Gambar 3.2 *Ultrasonic oscilloscope* untuk pengukuran kecepatan V_p dan atenuasi batuan

3.1.2 Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan sampel dilakukan menyebar pada sekitar wilayah Gunung Arjuno – Welirang, Jawa Timur. Pengambilan sampel berdasarkan perbedaan setiap unit satuan batuan. Pengambilan beberapa sampel untuk satu jenis batuan divariasikan tempat pengambilannya untuk mendapatkan koreksi pengukuran. Terdapat 6 titik pengambilan sampel berdasarkan perbedaan satuan batuanya, dengan detail lokasi, nama titik, dan satuan batuanya dapat dilihat pada gambar 3.4 dan tabel 3.1.

Tabel 3.1 Daftar nama sampel, satuan batuan, dan lokasi pengambilan sampel

Satuan Batuan	Nama Sampel	Easting (m)	Northing(m)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1	66875	9149318
	Qla	669022	9144238
	Qla3	668716	9148292
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw	681971	9147561
	Qltaw2	682704	9148716
	Qltaw3	682798	9146712
	Qltaw4	682710	9146718
	Qltaw5	682720	9147229
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1	679617	9150571
	Qaptaw2	679621	9150575

Satuan Batuan	Nama Sampel	Easting (m)	Northing(m)
Qes (Erupsi Samping)	Qes1	673122	9151147
	Qes2	673126	915152
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1	679953	9148629
	Qlw2	679887	9148572
	Qlw3	679863	9148521
	Qlw4	679872	9148582
	Qlw5	669214	9143792
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw-1	673657	9151350
	Qapw-2	673675	9151334



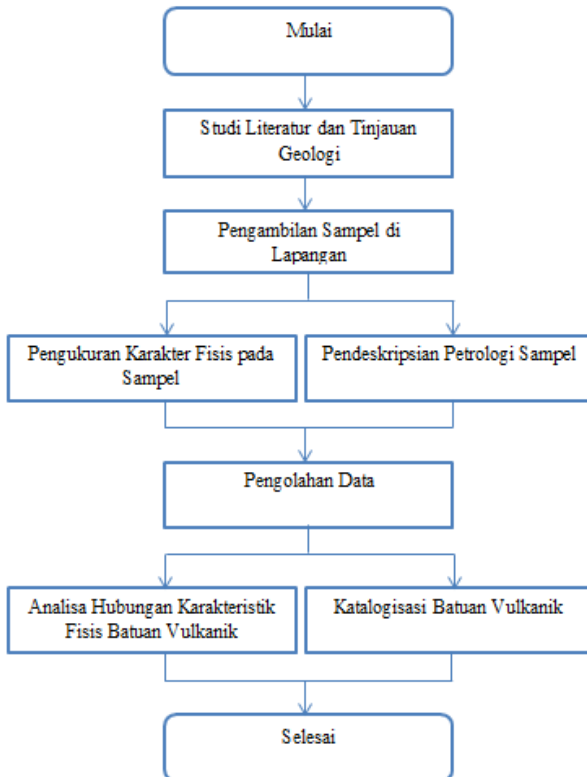
Gambar 3.3 Peta lokasi pengambilan sampel batuan pada 6 titik lokasi satuan batuan di Gunung Arjuno – Welirang

Sedangkan lokasi pengukuran sampel batuan yang telah didapatkan di lapangan dan pengolahan data di lakukan di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur.

3.2 Tahapan Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut (Gambar 3.4) :

Diagram Penelitian



Gambar 3.4 Diagram alir penelitian tugas akhir

3.2.1 Studi Literatur dan Tinjauan Geologi

Studi literatur berfungsi untuk mendapatkan referensi mengenai hubungan karakteristik fisis batuan beku terutama batuan vulkanik dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Sedangkan tinjauan geologi digunakan untuk mengetahui kondisi umum geologi regional, satuan batuan, dan jenis batuan wilayah penelitian, sehingga memudahkan

proses selanjutnya pada saat pengambilan sampel maupun saat analisa akhir.

3.2.2 Pengambilan Sampel Batuan di Lapangan dan Proses Coring

Pengambilan sampel batuan lapangan dilakukan di beberapa titik berbeda sesuai dengan desain yang telah dibuat sebelumnya. Dimana tiap 1 titik akan diambil beberapa sampel batuan yang sama namun dengan variasi lokasi. Dengan pemilihan 6 titik lokasi berdasarkan 6 jenis satuan batuan yang berbeda, diharapkan pengambilan sampel ini dapat mewakili kondisi geologi wilayah fokus penelitian sekitar Gunung Arjuno - Welirang. Selain itu referensi medan lapangan juga dijadikan penentuan wilayah pengambilan sampel untuk memudahkan proses pengambilan sampel.



Gambar 3.5 Pengambilan sampel untuk singkapan di lapangan

Pengambilan sampel batuan vulkanik permukaan di lapangan memiliki dimensi 20 x 20 x 20 cm per batuan, dengan 1 satuan batuan akan diambil 5 jenis sampel batuan berbeda lokasi. Sehingga diharapkan dapat mewakili pengkarakteristikan setiap satuan batuan secara baik. Kemudian setiap sampel akan dilakukan coring dengan menggunakan pisau coring diameter 5.8 – 6.8 cm, sehingga dihasilkan sampel batuan *coring* dengan diameter masing-masing 5.5 – 6.7 cm. Pemilihan dimensi diameter coring diperlukan untuk menyesuaikan bahan dengan diameter

transducer dan receiver pada alat sonic wave analyzer. Kemudian untuk memenuhi perhitungan karakter densitas dan atenuasi yang membutuhkan variasi panjang sampel pada pengukuran, maka setiap 1 sampel batuan dibuat 3 jenis coring dengan variasi panjang yang berbeda.

Dari pengambilan data sampel lapangan didapatkan 19 batuan yang berbeda dari 6 satuan batuan. Sedangkan dari hasil coring didapatkan 45 jenis sampel *coring*.

Tabel 3.2 Daftar sampel coring dan dimensinya

Satuan Batuan	Nama Sampel	Nama Sampel Coring	Diameter (mm)	Panjang (mm)
Qla (Lava Anjasmara)	Qla1	Qla1-A	57	96.45
		Qla1-B	56.22	46.93
	Qla	Qla1-C	56.28	27.72
		Qla-A	67.9	102.7
		Qla-B	67.57	20.65
	Qla3	Qla3-A	68.04	132.32
		Qla3-B	67.9	85.64
		Qla3-C	67.93	37.97
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw	Qltaw-A	68.06	55.07
		Qltaw-B	67.5	20.59
	Qltaw2	Qltaw2-A	67.84	87.03
		Qltaw2-B	67.07	19.21
	Qltaw3	Qltaw3-A	67.88	115.87
		Qltaw3-B	68.04	89.33
		Qltaw3-C	67.97	19.71
	Qltaw4	Qltaw4-A	67.96	104.8
		Qltaw4-B	67.79	49.51
		Qltaw4-C	67.8	19.21
	Qltaw5	Qltaw5-A	67.9	111.6
		Qltaw5-B	67.71	45.77
		Qltaw5-C	67.85	19.87

Satuan Batuan	Nama Sampel	Nama Sampel <i>Coring</i>	Diameter (mm)	Panjang (mm)
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1	Qaptaw1-A	67.88	84.94
		Qaptaw1-B	68.54	38.5
	Qaptaw2	Qaptaw2-A	67.97	110.58
		Qaptaw2-B	67.21	20.42
Qes(Erupsi Samping)	Qes1	Qes1-A	67.98	51.86
		Qes1-B	68.01	20.11
	Qes2	Qes2-A	68	67.95
		Qes2-B	67.93	21.46
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1	Qlw1-A	56.83	98.52
		Qlw1-B	56.2	32.51
		Qlw1-C	56.31	30.82
	Qlw2	Qlw2-A	56.45	80.54
		Qlw2-B	55.83	42.13
	Qlw3	Qlw3-A	55.79	73.85
		Qlw3-B	56.13	25.49
		Qlw3-C	55.81	24.38
	Qlw4	Qlw4-A	56.68	81.16
		Qlw4-B	56.35	37.06
	Qlw5	Qlw5-A	68.14	71.99
		Qlw5-B	67.13	18.57
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1	Qapw1-A	56.48	75.08
		Qapw1-B	57.17	50.44
	Qapw2	Qapw2-A	68.02	69.09
		Qapw2-B	68.12	42.5



Gambar 3.6 Hasil sampel coring dengan berbagai dimensi

3.2.3 Pengukuran Karakter Fisis Sampel Batuan

Sesuai dengan tujuan tugas akhir ini, pengukuran yang dilakukan untuk mengkarakterisasi fisis batuan vulkanik diantaranya pengukuran densitas, pengukuran kecepatan V_p , pengukuran atenuasi, dan pengukuran resistivitas. Pengukuran dilakukan pada semua sampel batuan yang telah dikondisikan sebagai *dry rocks*. Pengondisian *dry rocks* dilakukan dengan cara mengeringkan batuan dengan oven selama kurang lebih 6-8 jam pada suhu 250° .



Gambar 3.7 Proses pengeringan sampel dengan oven

Pengukuran densitas dilakukan dengan mengukur massa dan volume bulk batuan. Sedangkan pengukuran resistivitas didapatkan dari beda potensial dan arus yang mengalir melewati batuan vulkanik, sehingga diketahui resistivitasnya. Pada pengukuran resistivitas dapat digunakan 2 metode, yakni pengukuran secara axial (Gambar 3.2). Kemudian pengukuran kecepatan V_p didapatkan dari waktu tempuh gelombang V_p yang terekam di osiloskop dan juga panjang sampel. Untuk atenuasi diperlukan data amplitude, kecepatan, dan juga frekuensi pengukuran.

✓ **Pengukuran Data Densitas**

Pengukuran densitas sampel coring batuan dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes. Untuk melakukan pengukuran densitas dilakukan dengan mengambil data variabel ukur massa kering (M_k), berat kering (W_k), berat basah atau berat batuan saat batuan tersaturasi air dan dibuat dalam keadaan melayang (W_{sat}).



Gambar 3.8 Proses pengukuran variabel massa kering (m_k) batuan untuk pengukuran parameter densitas

✓ Pengukuran Data Kecepatan V_p

Transduser pada alat sonic ini adalah piranti yang dapat mengubah suatu bentuk energi kedalam bentuk energi lain. Transduser untuk merubah suatu sinyal listrik kedalam energi suara ultra yang dapat dipancarkan kedalam medium, dan receiver menerima energi mekanis yang kemudian diubah menjadi sinyal energy listrik

Sebelum perangkat osiloskop digunakan perlu dilakukakan kalibrasi alat osiloskop. Kemudian variabel yang diukur pada pengambilan data kecepatan V_p ialah waktu tempuh gelombang longitudinal dan dimensi panjang batuan. Waktu tempuh gelombang tertera pada grafik display osiloskop, yang untuk mendapatkan datanya akan dijelaskan pada bagian pengolahan data.



Gambar 3.9 Alat sonic wave analyzer, tranducer, receiver, dan osiloskop sebagai alat pengukuran kecepatan V_p dan atenuasi batuan

✓ Pengukuran Data Atenuasi

Amplitudo sinyal yang dihasilkan oleh gelombang sonic ini merupakan hasil respon impedansi akustik, saat gelombang ditransmisikan ke medium. Impedansi akustik suatu materi di

definisikan sebagai perkalian antara rapat jenis (ρ) dan kecepatan gelombang akustik (V)

$$Z = \rho \times V$$

Dimana : Z = impedansi akustik (kg/m²s)

ρ = massa jenis (kg/m³)

V = laju gelombang so(m/s)

Pengukuran atenuasi dapat dilakukan dengan mengukur *peak to peak amplitude* pada suatu batuan dengan dimensi panjang x dan membandingkannya dengan variasi dimensi panjang yang berbeda, namun jenis batuan yang sama. Perbedaan peak to peak amplitude antara dimensi panjang batuan yang berbeda disebabkan oleh pelemahan sinyal amplitude berdasarkan skala panjang batuan. Variabel yang terukur ialah peak to peak amplitude tegangan (Volt), namun parameter hasil atenuasi suatu batuan dapat dijelaskan dengan α atau faktor atenuasi (dB/m)

✓ **Pengukuran Data Resistivitas**

Pengukuran data resistivitas dilakukan dengan menggunakan alat ukur resistivitymeter yang terhubung dengan elektroda pada batuan. Elektroda dibuat dari lempengan tembaga yang menyentuh langsung ke batuan, dimampatkan, dan dihubungkan ke resistivitymeter. Variabel yang terukur pada resistivity meter ini berupa arus injeksi yang mengalir masuk ke batuan(Ampere) dan beda potensial di kedua ujung batuan (Volt). Dengan menghubungkan dengan hukum Ohm pada pengukuran resistivitas sebuah medium, maka parameter yang akan didapatkan ialah resistivitas jenis batuan (ρ) dengan satuan ohm.m.



Gambar 3.10 Pengukuran Resistivitas

3.2.4 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menganalisa data dari hasil pengukuran karakteristik fisis batuan. Dari setiap parameter yang terukur, seperti densitas, resistivitas, kecepatan V_p , dan atenuasi akan dibuat hubungan antar parameternya menggunakan grafik *crossplot* dan menghasilkan persamaan sederhana yang menghubungkan setiap parameter. Selain itu dibuat juga proses deskripsi batuan berdasarkan petrologi. Sehingga hasil akhir dari pada tugas akhir ini dapat dibuat sebuah kelompok data sebagai referensi hubungan karakteristik fisis batuan vulkanik dengan detail referensi petrologi setiap batumannya.

✓ Pengolahan Data Densitas

Pengolahan data densitas digunakan persamaan Hukum Archie, dengan mengukur variabel data M_k (massa kering batuan), W_{sat} (berat batuan saat tersaturasi), dan W_k (berat batuan saat kering) dan menghubungkannya dengan prinsip Archimedes, maka parameter yang ingin didapatkan ialah densitas kering atau dry density. Sesuai dengan prinsip Archimedes, apabila Setiap benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya kedalam fluida, akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Gaya keatas atau F_a didefinisikan,

$$F_a = W_k - W_{sat} \dots \dots \dots (3.2)$$

Sedangkan untuk keadaan benda tercelup sebagian atau seluruhnya berlaku hubungan

$$Fa = W_{batuan} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$\rho_{fl} \cdot Vb \cdot g = \rho_b \cdot Vb \cdot g \dots\dots\dots (3.4)$$

Dengan : ρ_{fl} = densitas fluida
 Vb = Volume batuan
 ρ_b = densitas batuan

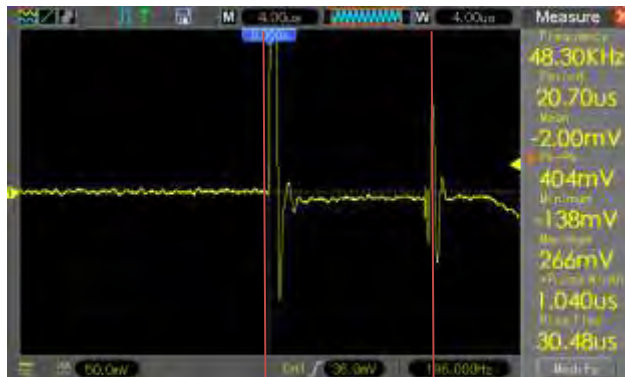
Maka dengan menggunakan persamaan 3.1 dan 3.3 yang disubstitusikan, maka

$$Wk - W_{sat} = \rho_{fl} \cdot Vb \cdot g \dots\dots\dots (3.5)$$

Kemudian apabila $= Mk/\rho_b$, maka parameter densitas batuan yang akan diketahui

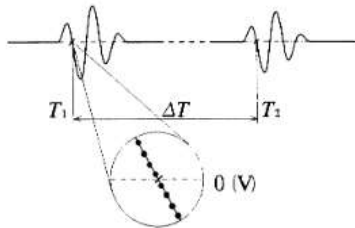
$$\rho_b = \rho_{fl} \cdot Mk \cdot g / (Wk - W_{sat}) \dots\dots\dots (3.6)$$

✓ Pengolahan Data Kecepatan Vp



Gambar 3.11 Proses pengambilan data t pada grafik *display* osiloskop

Proses *picking travel time* pulsa pertama dilakukan setelah melewati pulsa langsung (direct pulse), pulsa kecepatan gelombang longitudinal memiliki karakteristik yang khusus dan konstan, picking dapat dilakukan dengan metode *zero crossing method* untuk mendapatkan satu gelombang penuh.



Gambar 3.12 Zero crossing method

Setelah mendapatkan variabel tp maka untuk mendapatkan kecepatan Vp pada batuan, dapat menggunakan persamaan Vp

$$Vp = L/tp \dots\dots\dots (3.7)$$

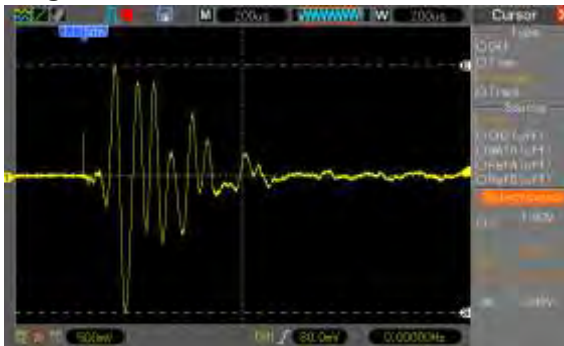
Dimana Vp = Kecepatan Vp batuan (m/s)

L = panjang dimensi batuan (m)

tp = travel time gelombang longitudinal (di alat dalam μsec)

diubah ke satuan sekon)

✓ Pengolahan Data Atenuasi



Gambar 3.13 Proses pengambilan data atenuasi gelombang dari grafik *display* osiloskop

Dengan berbagai penurunan dari persamaan amplitudo gelombang, diperoleh persamaan koefisien atenuasi α , sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot 20 \log \left(\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right) \dots\dots\dots (3.8)$$

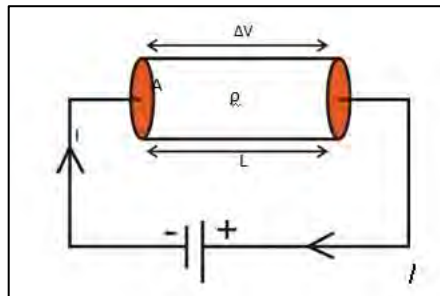
Dimana α = koefisien atenuasi (dalam $dB \cdot m^{-1}$)

$A(x)$ = amplitudo pada jarak x

$A(x_0)$ = amplitudo pada jarak x_0

✓ **Pengolahan Data Resistivitas**

Hukum Ohm pada rangkaian listrik sederhana untuk mengetahui resistansi suatu medium (gambar 3.14) dapat dinyatakan bahwa arus listrik I yang mengalir pada suatu silinder berbanding langsung dengan luas penampang A , berbanding lurus dengan beda potensial ΔV yang terjadi pada ujung-ujung silinder dan berbanding terbalik dengan panjang silinder L . Pengukuran ini dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa aliran arus listrik mengalir secara homogen pada batuan.



Gambar 3.14 Simulasi hasil pengukuran tahanan jenis batuan

Dengan $R = \rho \frac{L}{A}$ (3.9)

Dimana R = resistansi batuan (Ohm)

ρ = tahanan jenis batuan (Ohm meter)

L = dimensi panjang sampel coring batuan (m)

A = Luasan permukaan sampel coring batuan (m^2)

Karena pada alat pada *resistivitymeter* hanya menampilkan kuat arus terukur pada amperemeter dan bedapotensial pada voltmeter

Maka untuk mendapatkan variabel resistansi terukur ,

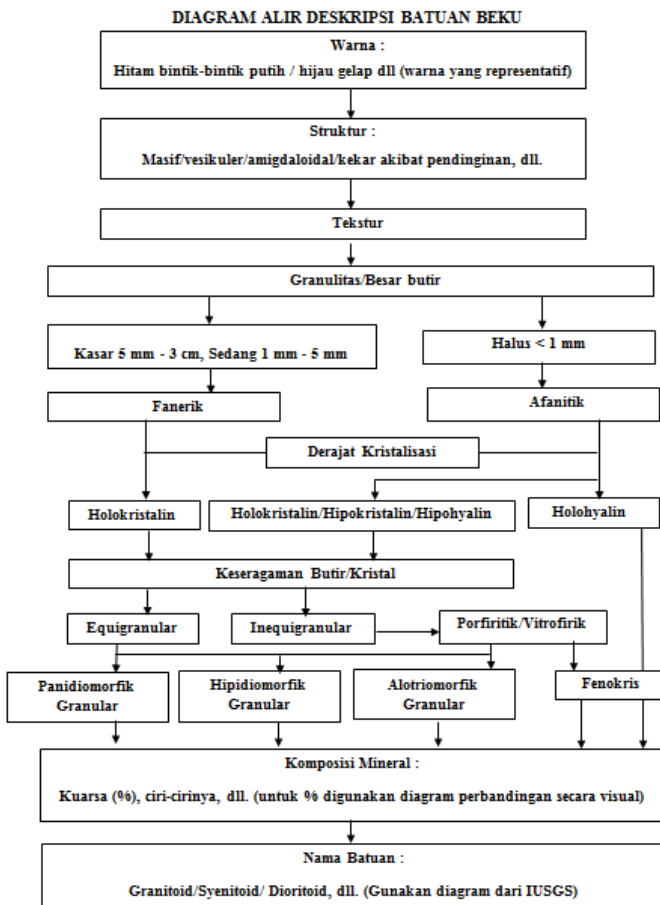
$$R = V/I \text{ (3.10)}$$

Dengan dimana faktor geometri dari pengambilan data pengukuran ini ialah L/A , maka parameter resistivitas atau tahanan jenis batuan :

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \text{ (3.11)}$$

3.2.5 Pendeskripsian Petrologi Batuan

Pendeskripsian petrologi batuan digunakan Digital Microscope dengan pembesaran hingga 100x yang diaplikasikan pada permukaan batuan. Kemudian untuk mendeskripsi mineral, warna, struktur, dan kristalisasi nya digunakan panduan diagram pada gambar 3.14. Dimana hasil setiap deskripsi secara detail pada borang di lampirkan pada lampiran.



Gambar 3.15 Diagram alir deskripsi batuan beku.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai analisa hasil pengukuran setiap parameter fisis, seperti densitas, resistivitas, kecepatan Vp dan atenuasi, kemudian dari setiap parameter akan dianalisa mengenai hubungan persamaannya dengan parameter lain, dan juga analisa petrologi batuan vulkanik dari sampel yang telah diambil di Komplek Gunung Arjuno-Welirang. Sehingga pada akhir pembahasan didapatkan integrasi analisa antara hubungan parameter fisika batuan dengan komposisi batuan dan proses terbentuknya batuan vulkanik.

Dari data hasil pengambilan sampel di lapangan, 6 satuan batuan yang telah diambil merupakan batuan dominan yang membentuk Komplek Gunung Arjuno-Welirang, selain itu 6 satuan batuan ini juga merupakan batuan yang diindikasikan prospektif untuk dieksplorasi kemudian, sehingga pemilihan 6 satuan batuan ini cukup untuk mewakili data fisika batuan yang terdapat di lokasi penelitian.

4.1 Analisa Petrologi Batuan Vulkanik

Sebagai pendahuluan untuk mengkarakterisasi hasil pengukuran fisis batuan vulkanik perlu dilakukan pendeskripsian singkat mengenai petrologi batuan vulkanik. Tujuan pendeskripsian ini agar lebih memudahkan untuk menganalisa karakter fisis setiap batuan vulkanik, karena telah dijelaskan dalam dasar teori bahwa faktor yang paling mempengaruhi batuan vulkanik kering atau *volcanic dry rock* ialah mineral batuan, kondisi mafik atau felsic batuan, rongga atau porositas batuan, dan juga rekahan (*fracture*).

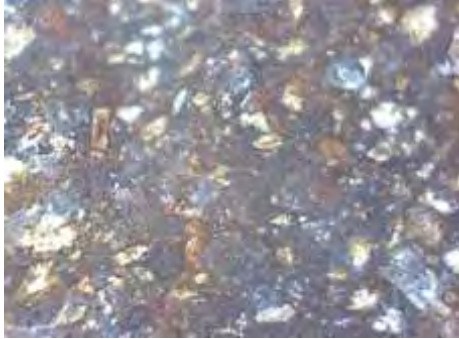
Pada analisa petrologi ini telah dideskripsi secara singkat setiap satuan batuan dan sampel mencakup ukuran kristal, hubungan antar kristal, tekstur, struktur, dan mineral dominan yang ada di batuan vulkanik tersebut.

Tabel 4.1 Daftar analisa petrologi singkat dari setiap sampel satuan batuan vulkanik

Satuan Batuan	Nama Sampel	Easting (m)	Northing(m)	Tipe Batuan Vulkanik	Deskripsi
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1	66875	9149318	Aliran Lava	Faneritik halus andesit-basaltis
	Qla	669022	9144238	Aliran Lava	Faneritik halus andesit-basaltis
	Qla3	668716	9148292	Aliran Lava	Afanitik andesit-basaltis
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw	681971	9147561	Aliran Lava	Mafik, afanitik, andesit-basaltis
	Qltaw2	682704	9148716	Aliran Lava	Vesikular, andesit-basaltis
	Qltaw3	682798	9146712	Aliran Lava	Vesikular, mafik, andesit-basaltis
	Qltaw4	682710	9146718	Aliran Lava	Mafik, afanitik andesit-basaltis
	Qltaw5	682720	9147229	Aliran Lava	Mafik, afanitik andesit-basaltis
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1	679617	9150571	Aliran Piroklastik	Faneritik halus, blok andesit-basalt
	Qaptaw2	679621	9150575	Aliran Piroklastik	Faneritik halus, blok andesit-basalt
Qes (Erupsi Samping)	Qes1	673122	9151147	Aliran Lava	Faneritik sedang
	Qes2	673126	915152	Aliran Lava	Faneritik sedang
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1	679953	9148629	Aliran Lava	Felsik, Faneritik halus basalt
	Qlw2	679887	9148572	Aliran Lava	Faneritik halus basalt
	Qlw3	679863	9148521	Aliran Lava	Faneritik halus basalt
	Qlw4	679872	9148582	Aliran Lava	Faneritik halus basalt
	Qlw5	669214	9143792	Aliran Lava	Felsik, Vesikular, Faneritik halus basalt
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw-1	673657	9151350	Aliran Piroklastik	Breksi basalt
	Qapw-2	673675	9151334	Aliran Piroklastik	Breksi basalt

Untuk satuan batuan Lava Anjasmara, batuan lava andesit-basaltis berwarna abu-abu gelap, mempunyai struktur masif, ukuran kristal (fenokris : 1-2 mm, massa dasar 1-5 mm), menunjukkan tekstur

berdasarkan kristalinitas holokristalin tekstur berdasarkan granularitas porfiroafanitik, berdasarkan hubungan antar kristal inequigranular, komposisi batuan berupa mineral utama piroksen, plagioklas, mineral sekunder kuarsa, olivin dan amfibol.



Gambar 4.1 *Hand sampling section* Satuan Lava Anjasmara (Qla) dengan pembesaran 100 x

Untuk satuan batuan Lava Arjuno-Welirang Tua, batuan lava andesit-basaltis berwarna abu-abu kehitaman, mempunyai struktur masif, ukuran kristal < 1 mm), menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas afanitik, berdasarkan hubungan antar kristal hipidiomorfik granular komposisi batuan diantaranya mineral utama kuarsa, plagioklas, piroksen, mineral sekunder olivin dan amfibol.



Gambar 4.2 *Hand sampling section* Satuan Lava Arjuno-Welirang Tua (Qltaw) dengan pembesaran 100 x

Untuk satuan batuan Lava Erupsi Samping, batuan lava andesit-basaltis berwarna abu-abu muda, mempunyai struktur vesikular,

ukuran kristal 2-5 mm menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas faneritik sedang, berdasarkan hubungan antar kristal allotiomorfik granular, komposisi batuan : mineral utama kuarsa, plagioklas mineral sekunder piroksen dan olivin



Gambar 4.3 *Hand sampling section* Satuan Lava Erupsi Samping (Qes) dengan pembesaran 100 x

Untuk satuan Lava Welirang I, batuan basalt berwarna abu-abu muda, mempunyai struktur masif, ukuran kristal 1-2 mm menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas faneritik halus, berdasarkan hubungan antar kristal allotiomorfik granular, komposisi batuan : mineral utama kuarsa, plagioklas mineral sekunder piroksen dan olivin



Gambar 4.4 *Hand sampling section* Satuan Lava Welirang I (Qlw I) dengan pembesaran 100 x

Kemudian untuk satuan batuan Aliran Piroklastik Tua Arjuno Welirang, merupakan batuan scoria, blok andesit-basaltik, berwarna

Abu-abu tua kecoklatan, berstruktur vesikuler aliran, terdapat aliran kristal dan pori lubang gas. Memiliki tekstur blok dengan ukuran butir 64-256 mm, dengan bentuk butir meruncing hingga hampir membulat. Berfragmen plagioklas, piroksen, kuarsa, olivine, dan amfibol dan bermatriks tufa pasiran berwarna kecoklatan.



Gambar 4.5 *Hand sampling section* Satuan Aliran Piroklastik Tua Arjuno Welirang (Qaptaw) dengan pembesaran 100 x

Kemudian untuk satuan batuan Aliran Piroklastik Welirang, merupakan batuan breksi piroklastik basalt, berwarna abu-abu muda kecoklatan, berstruktur vesikuler aliran, terdapat aliran kristal dan pori lubang gas. Memiliki tekstur blok dengan ukuran butir 64-256 mm, dengan bentuk butir meruncing hingga hampir membulat. Berfragmen plagioklas, piroksen, kuarsa, olivine, dan amfibol dan bermatriks tufa pasiran berwarna kecoklatan

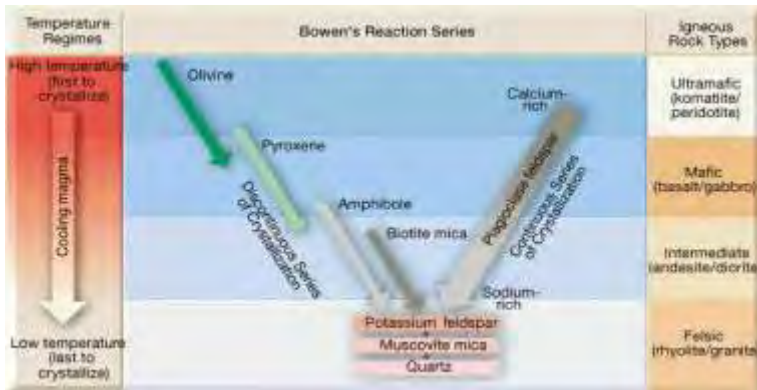


Gambar 4.6 *Hand sampling section* Satuan Aliran Piroklastik Welirang (Qapw) dengan pembesaran 100 x

Dari analisa petrologi ini dapat diketahui bahwa batuan vulkanik pada Komplek Gunung Arjuno-Welirang memiliki tipe intermediate hingga mafik. Untuk tipe mafik ditunjukkan pada satuan

batuan batuan Lava Anjasmara (Qla) dan satuan batuan Lava Tua Arjuno Welirang (Qltaw). Dianalisa mafik karena kedua satuan batuan ini memiliki mineral dominan basa, yakni mineral piroksen, amfibol, dan olivine. Sedangkan tipe batuan intermediate ditunjukkan pada satuan batuan yang lebih muda diantaranya satuan batuan Qapw, Qes, QlwI, dan Qaptaw. Dianalisa intermediate karena memiliki mineral dominan plagioklas dan feldspar. Maka dari itu batuan vulkanik daerah penelitian didominasi oleh batuan andesit-basaltik dan basalt.

Kemudian berdasarkan diagram reaksi Bowen (gambar 4.7) dapat diketahui bahwa satuan batuan yang lebih mafik pada Qla, dan Qltaw memiliki lingkungan magma dengan temperature yang tinggi pada saat pembentukan kristalnya. Seperti mineral olivine dan piroksen yang terbentuk pada lingkungan yang bertemperatur tinggi dibandingkan dengan mineral plagioklas yang teekristalisasi pada lingkungan bertemparatur rendah. Sedangkan untuk satuan batuan lainnya memiliki derajat kristalisasi dengan temperature menengah karena memiliki kristal-kristal yang intermediate.



Gambar 4.7 Diagram Reaksi Bowen (Pearson Prentice Hall, 2005)

Selain itu berdasarkan jenis produk vulkanik dan struktur batuan, batuan vulkanik sampel daerah penelitian memiliki tipe aliran lava sebagai produksi letusan efusiva dan tipe aliran piroklastik sebagai letusan eksplosiva. Untuk tipe aliran lava, ditemukan di lapangan terdiri dari lava permukaan, lava intrusi, dan lava vesikuler. Sedangkan tipe

piroklastik ditemukan di lapangan berupa batuan piroklastik berukuran butir blok, lapilli, dan tuff.

4.2 Analisa Karakterisasi Fisis Batuan Vulkanik

4.2.1 Analisa Karakter Densitas Batuan Vulkanik

Pada pengukuran densitas, telah dilakukan pengukuran 19 sampel batuan coring untuk densitas, mewakili sampel coring lainnya. Pengukuran densitas menggunakan prinsip hukum Archimedes setiap benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya kedalam fluida, akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Maka telah terukur massa kering dan volume *bulk* batuan, sehingga densitas kering dari setiap sampel batuan didapat seperti pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran densitas kering batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Densitas	Massa Kering (gram)	Volume (Fa) (cm ³)	Densitas Kering (g/cm ³)	Densitas Kering (kg/m ³)
Qla (Lava Anjasmara)	Qla1-B	209.6	70	2.994285714	2994.285714
	Qla	189.461	72	2.631402778	2631.402778
	Qla3-C	369.55	138.5	2.668231047	2668.231047
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-B	208.23	70.1	2.970470756	2970.470756
	Qltaw2-B	164.05	65	2.523846154	2523.846154
	Qltaw3-C	176.326	65.5	2.692	2692
	Qltaw4-C	203.286	64	3.17634375	3176.34375
	Qltaw5-C	197.65	65.8	3.003799392	3003.799392
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw 1-B	326.42	127	2.57023622	2570.23622
	Qaptaw 2-B	177.51	73	2.431643836	2431.643836
Qes (Erupsi Samping)	Qes1-B	185.72	66.9	2.776083707	2776.083707
	Qes2-B	201.35	75	2.684666667	2684.666667

QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1-C	182.11	66	2.759242424	2759.242424
	Qlw2-B	279.01	99	2.818282828	2818.282828
	Qlw3-C	168.64	64	2.635	2635
	Qlw4-B	234.72	93	2.523870968	2523.870968
	Qlw5-B	142.66	65.8	2.168085106	2168.085106
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw-1	283.87	115.5	2.457748918	2457.748918
	Qapw-2	597.29	243	2.457983539	2457.983539

Dari hasil pengukuran densitas, dapat dilihat variasi densitas batuan vulkanik sampel memiliki kisaran nilai 2600-3100 kg/m³ untuk batuan lava andesit-basaltis dan lava basalt, sedangkan untuk lava vesikular dan bom piroklastik memiliki densitas yang lebih rendah yakni berkisar 2100 -2500 kg/m³. Perbedaan nilai densitas antara lava ini tentu diakibatkan dari komponen penyusun batuan piroklastik maupun lava ekstrusif yang vesikuler yang berongga dikarenakan saat pembentukan mineral pada batuan tersebut, batuan terkontak langsung dengan udara sehingga mineral yang terbentuk tidak sempurna dan udara mengisi rongga-rongganya, sehingga batuan piroklastik dan lava vesikuler ini lebih ringan dan memiliki densitas yang rendah dibanding aliran lava.

Kemudian dari hasil pengukuran dapat terlihat batuan yang lebih mafik, seperti Satuan Lava Anjasamara dan Satuan Lava Arjuno-Welirang Tua memiliki densitas yang lebih besar, hal ini sejalan dengan umur yang tua dan kompaksi yang kuat menghasilkan densitas yang lebih besar.

Selain itu apabila bisa diidentifikasi dari pH penyusun batumannya, kedua batuan ini memiliki dominan mineral mafik dan memiliki warna batuan yang lebih gelap dibandingkan dengan batuan vulkanik yang lebih muda. Sejalan dengan Schoen, 2011, yang memberikan analisa bahwa densitas batuan beku akan meningkat dari batuan beku yang memiliki komposisi mineral felsik (asam) menuju batuan beku yang memiliki komposisi mineral mafik (basa).

Kemudian untuk mengevaluasi pengukuran pada setiap metode digunakan metode statistic untuk menghitung rata-rata, median, standar deviasi, dan standar error pengukuran yang dilampirkan secara lebih detail pada lampiran. Standar deviasi digunakan untuk menggambarkan seberapa jauh bervariasi data. Jika nilai SD jauh lebih besar

dibandingkan nilai mean, maka nilai mean merupakan representasi yang buruk dari keseluruhan data. Sedangkan jika nilai SD sangat kecil dibandingkan nilai mean, maka nilai mean dapat digunakan sebagai representasi dari keseluruhan data. Dengan demikian standard deviation (SD) memang merupakan cerminan dari rata-rata penyimpangan data dari mean. Sedangkan Standar Error merupakan nilai yang mengukur seberapa tepat kah nilai mean yang diperoleh.

Tabel 4.3 Rangkuman perhitungan statistik densitas kering batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Densitas	Densitas _ Kering (g/cm ³)	Rata-rata Densitas per satuan batuan	Standar Error Pengukuran (+/-)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-B	2.9943	2.7646398	7.224442449
	Qla	2.6314		
	Qla3-C	2.6682		
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-B	2.9705	2.873292	9.097172572
	Qltaw2-B	2.5238		
	Qltaw3-C	2.692		
	Qltaw4-C	3.1763		
	Qltaw5-C	3.0038		
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-B	2.5702	2.50094	3.918511202
	Qaptaw2-B	2.4316		
Qes (Erupsi Samping)	Qes1-B	2.7761	2.7303752	2.367499143
	Qes2-B	2.6847		
Qlw1(Lava Welirang I)	Qlw1-C	2.7592	2.5808963	9.968251461
	Qlw2-B	2.8183		
	Qlw3-C	2.635		
	Qlw4-B	2.5239		
	Qlw5-B	2.1681		
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw-1	2.4577	2.4578662	0.006749852
	Qapw-2	2.458		

4.2.2 Analisa Karakter Resistivitas Batuan Vulkanik

Pada pengukuran resistivitas, telah dilakukan pengukuran 19 sampel batuan *coring* untuk resistivitas, mewakili sampel *coring* lainnya. Pada pengukuran ini, batuan dalam keadaan *dry rocks* atau telah melewati proses pengeringan. Karena resistivitas sangat sensitif sekali dengan adanya fluida di dalamnya, sehingga proses pengeringan di penelitian ini perlu dilakukan, sehingga faktor analisa yang mempengaruhi pada resistivitas batuan bisa dibatasi dari komponen penyusun batumannya saja.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran resistivitas kering batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Resistivitas	Rata-Rata Resistivitas_Kering (Ohm.m)	% Error (Rata-rata/StandarDevias)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-A	9808.211	5.59099553
	Qla-A	38035.2	14.2068832
	Qla3-A	113178.8	5.60651359
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-A	185477.7	14.0571281
	Qltaw2-A	259681.2	12.2484079
	Qltaw3-A	98280.54	5.71423302
	Qltaw4-A	79246.02	7.84005031
	Qltaw5-A	40955.17	1.79521467
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-A	68792.45	5.036752
	Qaptaw2-B	130639	2.22567692
Qes (Erupsi Samping)	Qes1-A	51796.79	5.56735289
	Qes2-A	73817.69	7.93625194
Qlw1(Lava Welirang I)	Qlw1-A	31974.16	6.67320953
	Qlw2-B	83479.05	5.79195219

	Qlw3-A	106215	6.74644328
	Qlw4-A	145161.7	6.53134581
	Qlw5-A	181305.1	14.6849415
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1-B	63075.602	8.047577333
	Qapw2-A	99415.558	8.047577333

Pengukuran dilakukan 8 kali berulang pada setiap sampel *coring* yang sama, dari 8 kali hasil pengukuran tersebut, diambil nilai rata-rata. Kemudian untuk melihat % error pengukuran yang terjadi pada pengukuran, digunakan standar deviasi untuk melihat simpangan dari variasi sebaran data hasil pengukuran. Dari % error tersebut dilihat tidak lebih dar 15% error sehingga hasil data resistivitas tiap batuan vulkanik cukup bisa digunakan sebagai referensi.

Karena rentang resistivitas memiliki nilai yang besar, maka untuk menginterpretasikan hasil kuantitatif dari pengukuran pada batuan vulkanik ini, rentang nilai resistivitas masing-masing batuan berbeda.

Dari hasil pengukuran dapat dilihat bahwa satuan batuan Lava Welirang I dan beberapa batuan piroklastik memiliki nilai resistivitas yang lebih tinggi dibanding dengan satuan batuan dengan kategori lava seperti Qla, Qltaw, dan Qes. Dilihat dari deskripsi petrologi yang telah dilakukan dimungkinkan bahwa mineral penyusun batuan QlwI memiliki resistivitas yang lebih tinggi. Selain itu faktor porositas yang terdapat pada batuan lava dan piroklastik memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada tingginya nilai porositas dan resistivitas.

Batuan lava vesikuler atau berongga maupun piroklastik memiliki fase pendinginan yang cepat dan faktor tekanan yang rendah, sehingga menghasilkan bentukan pori di batuan karena mineral tidak terbentuk sempurna. Batuan vulkanik yang memiliki porositas seperti pada satuan batuan Qaptaw dan Qapw memiliki resistivitas yang tinggi akibat pori yang berada di batuan tidak menghambat aliran listrik yang masuk dan kontak dengan mineral batuan, sehingga lebih konduktif.

Tabel 4.5 Rangkuman perhitungan statistik resistivitas kering batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Resistivitas	Rata-Rata Resistivitas Kering(Ohm.m)	Rata-Rata Resistivitas per satuan batuan(Ohm.m)	Standar Error Pengukuran (+/-)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-A	9.8082109	53.6740625	25.18729349
	Qla-A	38.035201		
	Qla3-A	113.17878		
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-A	185.47769	132.7281192	39.60356187
	Qltaw2-A	259.68118		
	Qltaw3-A	98.28054		
	Qltaw4-A	79.246017		
	Qltaw5-A	40.95517		
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-A	68.792449	99.71572536	30.92327599
	Qaptaw2-B	130.639		
Qes (Erupsi Sampling)	Qes1-A	51.796787	62.80723884	11.01045215
	Qes2-A	73.817691		
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1-A	31.974161	109.6269904	25.61814034
	Qlw2-B	83.479047		
	Qlw3-A	106.21496		
	Qlw4-A	145.16172		
	Qlw5-A	181.30507		
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1-B	63.075602	81.24557994	18.16997799
	Qapw2-A	99.415558		

4.2.3 Analisa Karakter Kecepatan Vp Batuan Vulkanik

Pada pengukuran kecepatan Vp ini, sebelumnya dilakukan kalibrasi alat menggunakan aluminium dengan panjang 30 cm,

funksinya untuk mengetahui frekuensi yang sesuai dan bentuk gelombang yang dihasilkan.

Dengan mengestimasi rentang kecepatan V_p yang akan dihasilkan pada batuan dan mengkondisikan agar hanya 1n- gelombang yang masuk di batuan, maka frekuensi dapat disesuaikan. Frekuensi yang digunakan 60 – 200 khZ, dengan gelombang input berupa gelombang kotak dan amplitude 15 Vpp.

Dari pengambilan data didapatkan waktu tempuh seperti pada table 4.2, dimana beberapa gambar gelombang output yang dihasilkan osiloskop dilampirkan pada lampiran.

Tabel 4.6 Hasil pengukuran kecepatan V_p batuan vulkanik

Satuan Batuan	<i>Coring Velocity</i>	Panjang Batuan(m)	Waktu tempuh (μ s)	V_p (m/s)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-A	0.09645	14.5	6651.724138
	Qla-A	0.1027	18	5705.555556
	Qla3-A	0.13232	22.5	5880.888889
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-A	0.0557	8.4	6630.952381
	Qltaw2-A	0.01921	3.55	5411.267606
	Qltaw3-A	0.11587	19.5	5942.051282
	Qltaw4-A	0.04951	7.9	6267.088608
	Qltaw5-A	0.1116	16.5	6763.636364
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-A	0.08494	15.4	5515.584416
	Qaptaw2-B	0.02042	4	5105
Qes (Erupsi Samping)	Qes1-A	0.05186	8.5	6101.176471
	Qes2-A	0.06795	11.7	5807.692308
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1-A	0.09852	16	6157.5
	Qlw2-B	0.08054	13.6	5922.058824
	Qlw3-A	0.07385	12.8	5769.53125
	Qlw4-A	0.08116	15.2	5339.473684
	Qlw5-A	0.07199	16.5	4363.030303
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1	0.07508	14.4	5213.888889
	Qapw2	0.06909	13.6	5080.147059

Dari hasil pengukuran, kecepatan gelombang kompressional ini lebih besar nilainya pada batuan lava lebih tua seperti Qla, Qltaw, dan

Qes. Dari analisa petrologi dilihat bahwa porositas yang ada batuan ini sangatlah kecil dibandingkan dengan batuan Qlw I maupun batuan piroklastik lainnya, sehingga kecepatan Vp nya memiliki nilai rentang antara 5500-6600 m/s.

Tabel 4.7 Hasil perhitungan statistik kecepatan Vp batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Velocity	Vp (km/s)	Rata-rata Vp per satuan batuan	Standar Error Pengukuran (+/-)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-A	6.6517241	6.079389527	0.290608915
	Qla-A	5.7055556		
	Qla3-A	5.8808889		
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-A	6.6309524	6.202999248	0.244591306
	Qltaw2-A	5.4112676		
	Qltaw3-A	5.9420513		
	Qltaw4-A	6.2670886		
	Qltaw5-A	6.7636364		
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-A	5.5155844	5.310292208	0.205292208
	Qaptaw2-B	5.105		
Qes (Erupsi Samping)	Qes1-A	6.1011765	5.954434389	0.146742081
	Qes2-A	5.8076923		
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1-A	6.1575	5.510318812	0.316308662
	Qlw2-B	5.9220588		
	Qlw3-A	5.7695313		
	Qlw4-A	5.3394737		
	Qlw5-A	4.3630303		
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1	5.2138889	5.147017974	0.066870915
	Qapw2	5.0801471		

4.2.4 Analisa Karakter Atenuasi Batuan Vulkanik

Pada pengukuran atenuasi ini digunakan frekuensi sinyal ultrasonik yang sejenis 1 Mhz , dan *amplitude input* ke batuan sebesar 20 Vpp. Dari setiap sampel batuan didapatkan 2 data *amplitude* yang berbeda dari 2 variasi panjang batuan yang berbeda. Karena prinsip dari parameter koefisien atenuasi ialah seberapa besar amplitud yang hilang per satuan jarak pada batuan tersebut.

Tabel 4.8 Hasil pengukuran koefisien atenuasi batuan vulkanik

Satuan Batuan	<i>Coring</i>	Koefisien Atenuasi α (dB/m) x 10 ⁻³
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1	0.11469978
	Qla	0.017857239
	Qla3	0.106116026
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw	0.174611366
	Qltaw	0.046478282
	Qltaw	0.125220464
	Qltaw4	0.186997511
	Qltaw5	0.056060892
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1	0.114047297
	Qaptaw2	0.083332656
Qes (Erupsi Samping)	Qes1	0.157403133
	Qes2	0.205257584
QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1	0.106705808
	Qlw2	0.156745637
	Qlw3	0.22272386
	Qlw4	0.166882896
	Qlw5	0.237455887
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1	0.087021079
	Qapw2	0.072892074

Dari hasil pengukuran didapatkan bahwa koefisien atenuasi batuan vulkanik yang terukur berkisar antara $0.07 - 0.23 \times 10^{-3}$ dB/mm. Nilai koefisien atenuasi batuan vulkanik ini sangat kecil dibandingkan dengan batuan sedimen, hal ini telah sesuai dengan referensi. Koefisien atenuasi yang kecil mengartikan bahwa *amplitude* yang hilang per satuan jarak sangat kecil besarnya. Parameter ini berhubungan dengan faktor atenuasi Q batuan (persamaan 2.14), apabila nilai koefisien atenuasi batuan α memiliki nilai kecil, maka faktor kualitas atenuasi Q batuan besar, yang mengartikan sifat intrinsik faktor atenuasi, peredaman atau absorpsi energi gelombang seismic pada batuan vulkanik sangatlah besar sehingga hanya sedikit energi yang tedispasi ataupun yang kembali ke *receiver*.

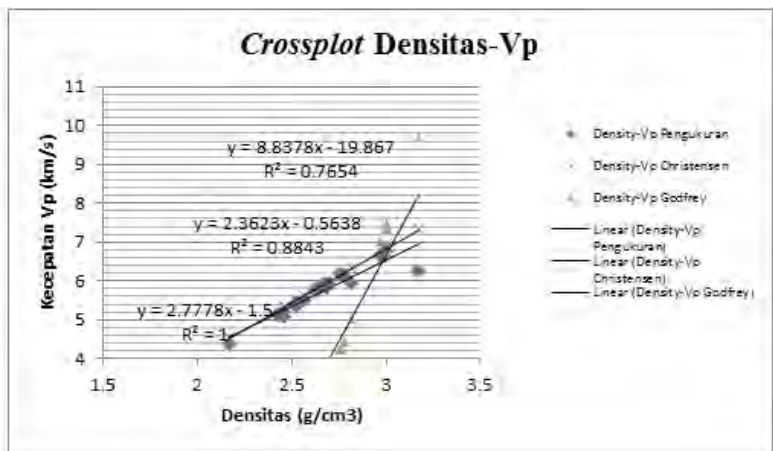
Tabel 4.9 Rangkuman perhitungan statistik koefisien atenuasi batuan vulkanik

Satuan Batuan	Coring Densitas	Koefisien Atenuasi α (dB/m) x 10-3	Rata-rata α per satuan batuan (dB/m) x 10-3	Standar Error Pengukuran (+/-)
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1	0.11469978	0.079557682	0.030949575
	Qla	0.017857239		
	Qla3	0.106116026		
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw	0.174611366	0.117873703	0.029128481
	Qltaw	0.046478282		
	Qltaw	0.125220464		
	Qltaw4	0.186997511		
	Qltaw5	0.056060892		
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1	0.114047297	0.098689976	0.01535732
	Qaptaw2	0.083332656		
Qes (Erupsi Sampling)	Qes1	0.157403133	0.181330359	0.023927226
	Qes2	0.205257584		

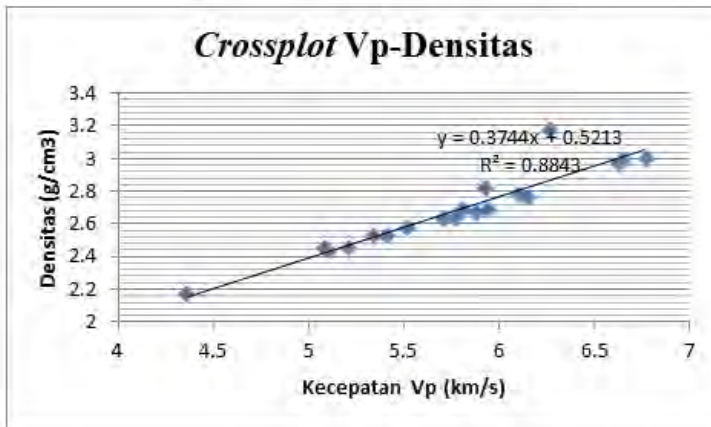
Qlw1(Lava Welirang I)	Qlw1	0.106705808	0.178102818	0.023657317
	Qlw2	0.156745637		
	Qlw3	0.22272386		
	Qlw4	0.166882896		
	Qlw5	0.237455887		
Qapw(Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1	0.087021079	0.079956577	0.007064502
	Qapw2	0.072892074		

4.3 Analisa Hubungan Parameter Fisis Batuan Vulkanik

4.3.1 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Kecepatan Vp



(a)



(b)

Gambar 4.8 Crossplot hubungan Densitas-Vp pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

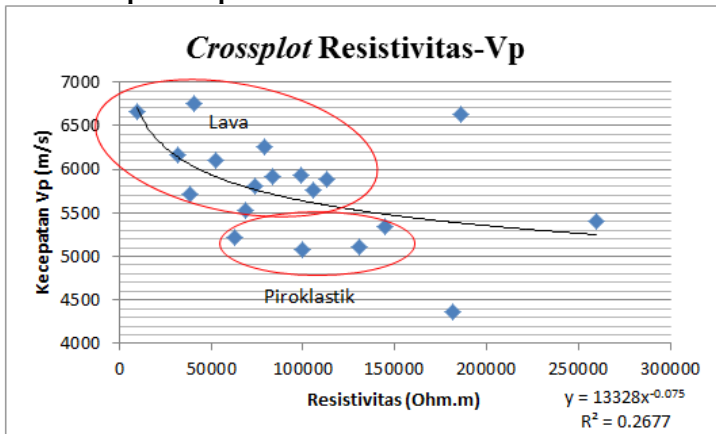
Dari hasil *crossplot* didapatkan bahwa kenaikan densitas sangat berkorelasi dengan kenaikan Kecepatan Vp, dari batuan vulkanik yang terukur densitas dan kecepatan Vp naik dari batuan piroklastik, Qlw I, Qes, Qltaw, dan Qla. Hal ini dikarenakan batuan piroklastik yang telah dibahas sebelumnya memiliki rongga atau pori yang terbentuk di batumannya.

Selain itu hasil analisa *trendline* menunjukkan *trendline* yang mirip dengan referensi hubungan parameter densitas-Vp sebelumnya, yakni persamaan Christensen dan Godfrey. Persamaan tersebut menjadi referensi *modeling* densitas-Vp pada batuan vulkanik. Sehingga persamaan pada tabel 4.10 dapat dijadikan referensi untuk *modeling* densitas-Vp pada batuan vulkanik di Indonesia khususnya untuk studi kasus Gunung Arjuno Welirang.

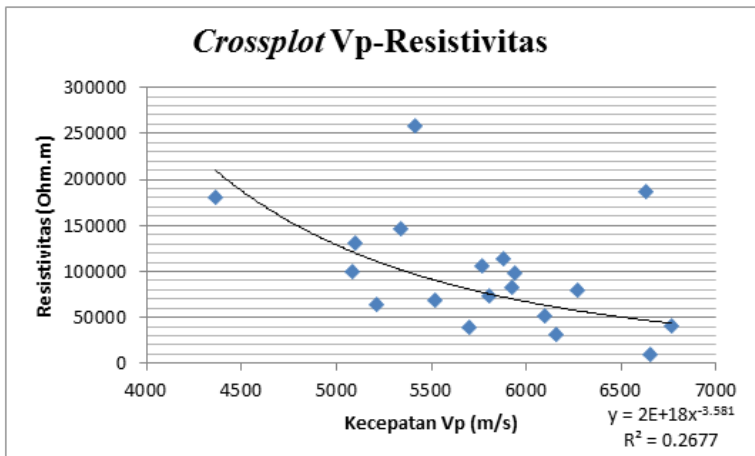
Tabel 4.10 Persamaan hubungan parameter Densitas-Vp dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Densitas-Vp Pengukuran	$Vp = 2.7778\rho - 1.5$
Densitas-Vp Christensen	$Vp = 2.3623 \rho - 0.5638$
Densitas Vp Godfrey	$Vp = 8.8378 \rho - 19.867$
Vp-Densitas	$\rho = 0.3744Vp + 0.5213$

4.3.2 Analisa Hubungan Parameter Resistivitas dengan Kecepatan Vp



(a)



(b)

Gambar 4.9 *Crossplot* hubungan Resistivitas-Kecepatan Vp pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

Untuk analisa hubungan parameter resistivitas-kecepatan Vp telah didapatkan referensi persamaan Faust, dimana

$V_{faust}(m/s) = 125.3(\rho Z)^{1/6}$ (4.1)

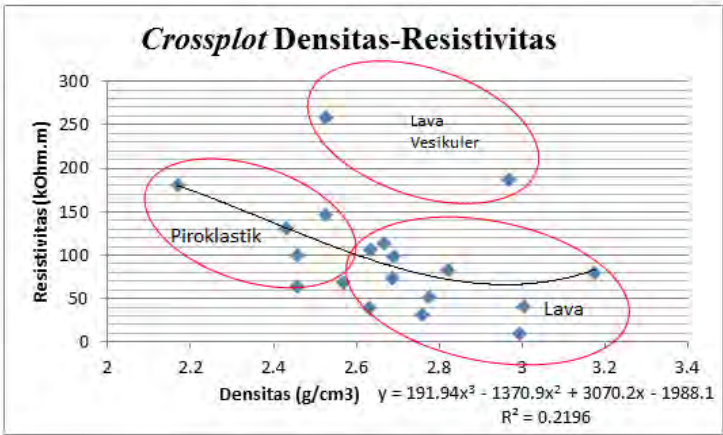
Namun karena persamaan ini hanya dapat diaplikasikan pada batuan sedimen yang resistivitasnya tidak setinggi batuan beku/vulkanik, maka saat dibandingkan ketika digunakan untuk studi kasus ini, perolehan nilai kecepatan Vp nya sangat besar dan tidak sesuai, maka persamaan yang telah dilakukan dari hasil pengukuran cukup dapat digunakan referensi untuk *modeling* resistivitas-kecepatan Vp maupun inversnya sebagaimana tertera pada tabel 4.11.

Kemudian dari hasil *crossplot* didapatkan nilai kecepatan Vp yang menurun akan meningkatkan nilai resistivitas batuan vulkanik, hal ini dapat terjadi karena selain mineral yang berpengaruh, faktor porositas dan rekah dapat mempengaruhi tingginya nilai resistivitas pada batuan vulkanik kondisi kerinr (*dry rocks*).

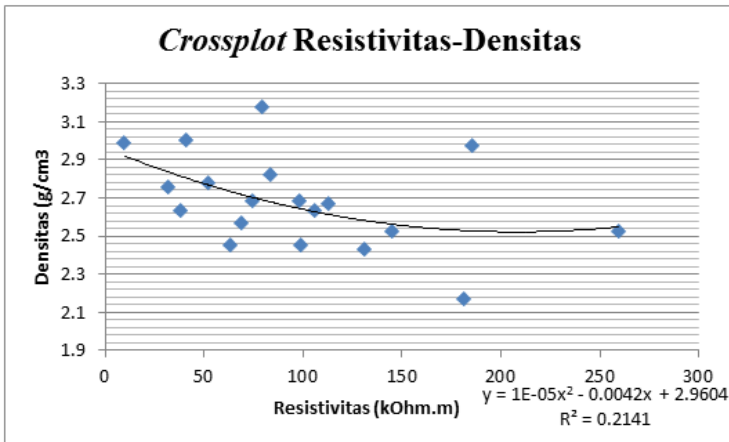
Tabel 4.11 Persamaan hubungan parameter Resistivitas-Vp dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Resistivitas-Vp	$Vp = 13328\rho^{-0.075}$
Vp-Resistivitas	$\rho = 2E+18Vp^{-3.581}$

4.3.3 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Resistivitas



(a)



(b)

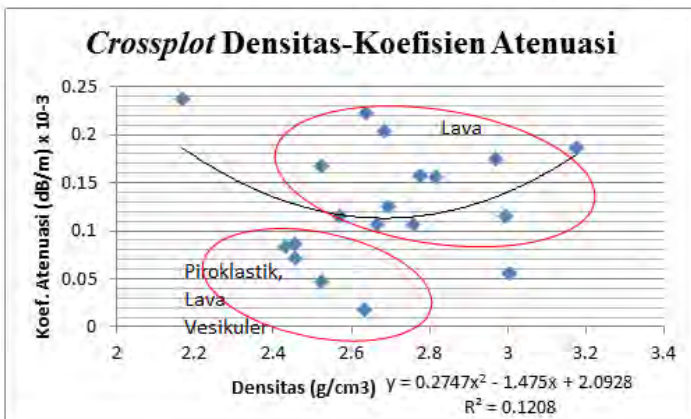
Gambar 4.10 Crossplot hubungan Densitas-Resistivitas pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

Meskipun korelasi hubungan antara densitas dengan resistivitas tidak memiliki nilai yang cukup tinggi, namun hasil interpretasi *crossplot* sesuai dengan hasil analisa pengukuran sebelumnya. Dimana pada studi kasus batuan vulkanik ini untuk lava, semakin tinggi nilai densitas, semakin turun nilai resistivitas pada sampel kering ini. Sedangkan pada batuan vulkanik piroklastik dan juga lava vesikuler yang memiliki cukup banyak pori memiliki nilai resistivitas yang tinggi. Hal ini telah dijelaskan bahwa batuan kering yang memiliki porositas lebih memiliki nilai resistivitas yang tinggi dibanding dengan batuan sejenisnya yang lebih rapat. Sehingga faktor porositas, rekah, dan tentunya mineral yang terkandung pada batuan ini sangat berpengaruh pada resistivitas batuan vulkanik.

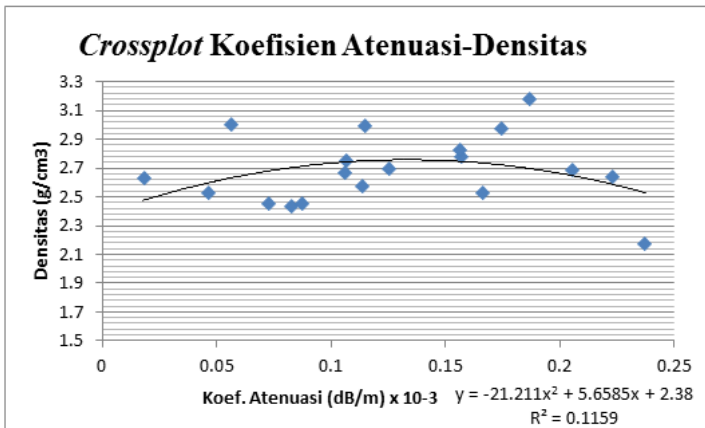
Tabel 4.12 Persamaan hubungan parameter Densitas-Resistivitas dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Densitas-Resistivitas	$\text{presist} = 191.94x^3 - 1370.9x^2 + 3070.2x - 1988.1$ (x= densitas)
Resistivitas-Densitas	$\text{pdensitas} = 10^{-5} x^2 - 0.0042x + 2.9604$ (x=resistivitas)

4.3.4 Analisa Hubungan Parameter Densitas dengan Atenuasi



(a)



(b)

Gambar 4.11 *Crossplot* hubungan Densitas-Koefisien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

Dari hasil *crossplot* (Gambar 4.9) dapat dilihat bahwa dengan densitas meningkat, koefisien atenuasi menurun. Sehingga diinterpretasikan seiring meningkatnya densitas, koefisien atenuasi menurun, dan faktor

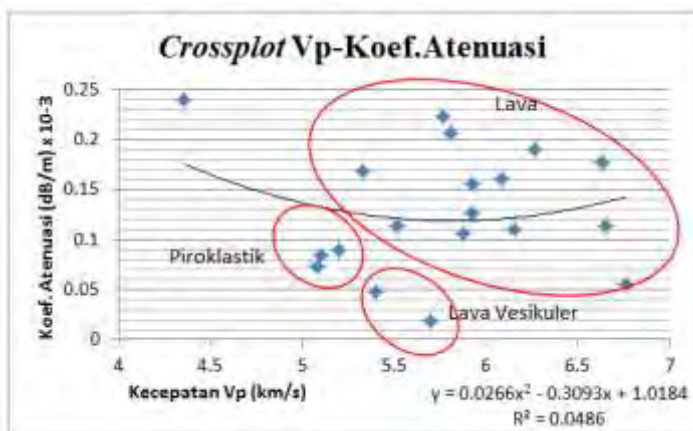
kualitas peredaman/atenuasi Q pada batuan sangat besar, sehingga batuan vulkanik berdensitas tinggi memiliki redaman atau atenuasi yang tinggi saat gelombang seismik menjalar dibatuan tersebut, sehingga energi gelombang yang terpantulkan maupun ditransmisikan teredam besar di batuan ini.

Sedangkan untuk batuan piroklastik dan lava vesikuler memiliki koefisien atenuasi yang cukup kecil dan memiliki *trendline* sendiri, hal ini mungkin dapat dikarenakan faktor rekahan dan mikrostruktur didalamnya yang mengakibatkan turunnya nilai koefisien atenuasi.

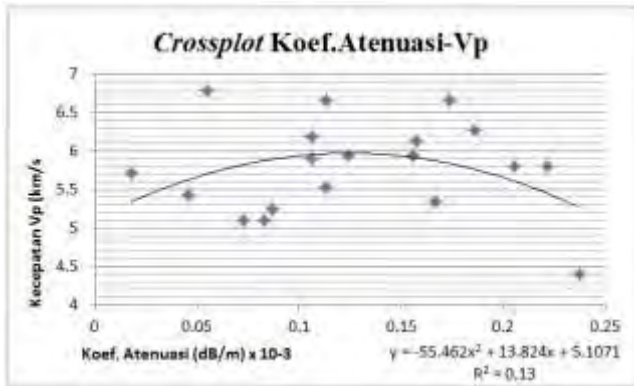
Tabel 4.13 Persamaan hubungan parameter Koefisien Atenuasi-Densitas dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Densitas-Koef. Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$
Koef. Atenuasi -Densitas	$\rho = -21.211\alpha^2 + 5.6585\alpha + 2.38$

4.3.5 Analisa Hubungan Parameter Kecepatan V_p dengan Atenuasi



(a)



(b)

Gambar 4.12 *Crossplot* hubungan Kecepatan Vp-Koefisien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

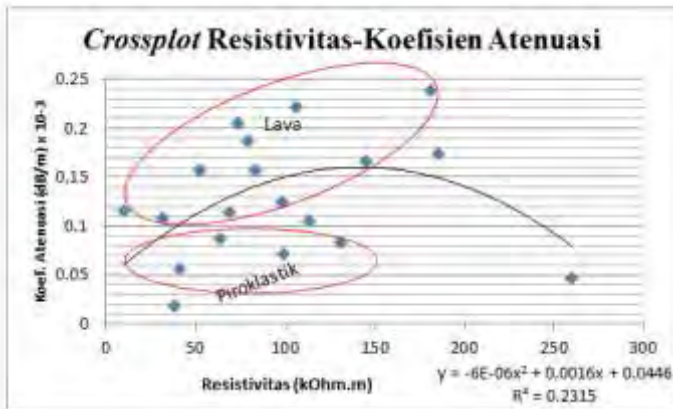
Begitupula dengan parameter kecepatan Vp meningkat, koefisien atenuasi menurun pada hasil *crossplot*. Sehingga diinterpretasikan seiring meningkatnya kecepatan gelombang kompresional Vp, koefisien atenuasi menurun, dan faktor kualitas peredaman/atenuasi Q pada batuan sangat besar, sehingga batuan vulkanik berkecepatan Vp tinggi memiliki redaman atau atenuasi yang tinggi saat gelombang seismik menjalar dibatuan tersebut, sehingga energi gelombang yang terpantulkan maupun ditransmisikan teredam besar di batuan ini.

Untuk *trendline* batuan piroklastik tidak memiliki perbedaan yang jauh dari *trendline* batuan lava, sedangkan lava vesikuler terlihat memiliki nilai koefisien atenuasi yang lebih kecil, meskipun memiliki kecepatan Vp yang lebih tinggi dibandingkan batuan piroklastik. Hal ini disebabkan lava vesikuler yang merupakan hasil efusiva gunung api lebih memiliki mineral yang terbentuk dibandingkan dengan piroklastik yang merupakan hasil ekstrusif sehingga mineral belum sempat terbentuk.

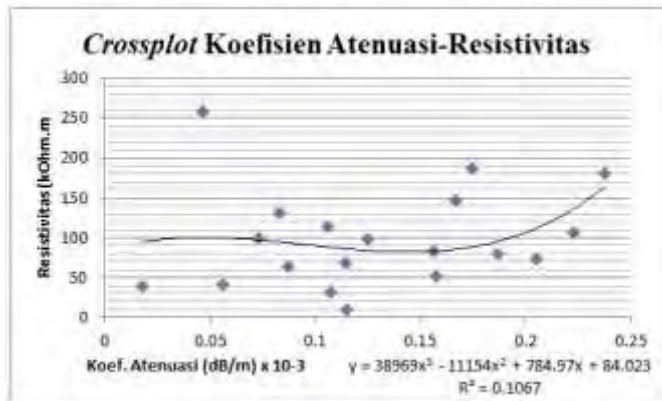
Tabel 4.14 Persamaan hubungan parameter Kecepatan Vp-Koefisien Atenuasi dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Kecepatan Vp-Koef. Atenuasi	$\alpha = 0.0266V_p^2 - 0.3093V_p + 1.0184$
Koef. Atenuasi –Kecepatan Vp	$V_p = -55.462 \alpha^2 + 13.82 \alpha + 5.1071$

4.3.6 Analisa Hubungan Parameter Resistivitas dengan Atenuasi



(a)



(b)

Gambar 4.13 Crossplot hubungan Resistivitas-Koefisien Atenuasi pengukuran (a) dan hubungan inversnya(b)

Kemudian dari hasil *crossplot* hubungan resistivitas dan koefisien atenuasi terlihat *trend* resistivitas meningkat, koefisien atenuasi meningkat. Pada batuan vulkanik yang terukur ini dapat diinterpretasikan bahwa semakin tinggi resistivitas batuan, maka koefisien atenuasi meningkat, faktor kualitas atenuasi/redaman Q memiliki nilai yang kecil, sehingga faktor dispersi besar, dimana energi gelombang seismik dapat merefleksikan atau mentransmisikan kembali secara baik ke *receiver* ataupun ke batuan lainnya.

Tabel 4.15 Persamaan hubungan parameter Resistivitas-Koefisien Atenuasi dan inversnya

Hubungan Parameter	Persamaan
Resistivitas-Koef. Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$
Koef. Atenuasi – Resistivitas	$\rho = -21.211\alpha^2 + 5.6585\alpha + 2.38$

Tabel 4.16 Rangkuman persamaan setiap hubungan parameter dan koefisien determinan

Hubungan Parameter	Persamaan	Koefisien Determinasi	Keterangan
Densitas – Kecepatan Vp	$V_p = 2.7778\rho - 1.5$	0.8843	Berbanding lurus
Resistivitas – Kecepatan Vp	$V_p = 13328\rho^{-0.075}$	0.2677	Berbanding Terbalik
Densitas – Resistivitas	$\rho_{\text{resist}} = 191.94x^3 - 1370.9x^2 + 3070.2x - 1988.1$ (x= densitas)	0.2196	Berbanding Terbalik
Densitas – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$	0.1208	Berbanding Terbalik
Kecepatan Vp – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.0266V_p^2 - 0.3093V_p + 1.0184$	0.3756	Berbanding Terbalik
Resistivitas – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$	0.2315	Berbanding Lurus

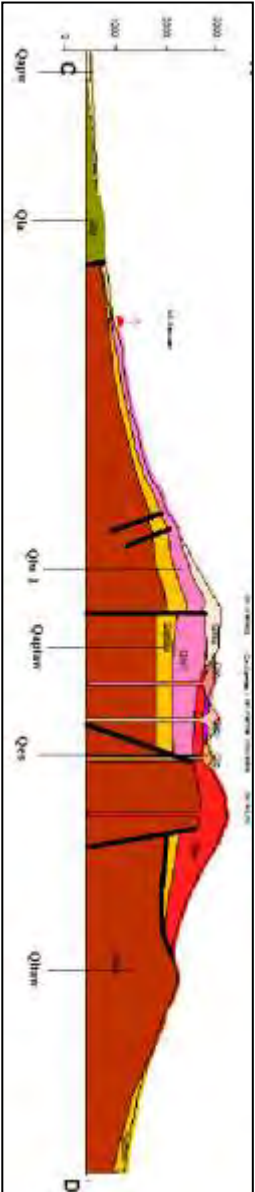
Tabel 4.16 menjelaskan rangkuman persamaan setiap hubungan parameter densitas, kecepatan V_p , resistivitas, dan atenuasi pada batuan vulkanik, beserta koefisien determinasinya. Koefisien determinasi ini menunjukkan seberapa besar faktor variabel yang mempengaruhi parameter di setiap persamaan. Semakin mendekati nilai 1 maka variabel tersebut sangat berpengaruh pada parameter. Nilai koefisien determinasi yang kecil didapatkan pada beberapa *crossplot* hasil kurva *fitting* pada penelitian ini disebabkan oleh persebaran data yang melebar dan kurangnya data di beberapa titik, maka untuk menginterpretasikan kurva yang seperti ini dibuatlah kelompok trend berdasarkan produk tipe vulkanik.

Kemudian untuk keterangan dari hubungan parameter menjelaskan bahwa apabila berbanding lurus, maka apabila variabel naik nilainya maka parameter juga akan semakin besar nilainya, sedangkan untu berbanding terbalik, apabila variabel turun nilainya, maka parameter akan naik nilainya.

4.4 Analisa Integrasi

Dari gambar 4.14, pada penelitian ini telah terambil sampel 6 satuan batuan yang mendominasi batuan vukanik di Gunung Arjuno Welirang. Dari keenam satuan batuan ini, secara petrologi memiliki karakter batuan vulkanik yang berbeda. Pada analisa hubungan di sub bab sebelumnya, dikategorikan 3 karakter yang berbeda, yakni batuan vulkanik lava, batuan piroklastik, dan lava vesikuler. Pengelompokkan ini digunakan untuk memudahkan analisa parameter-parameter fisis yang telah dilakukan. Kategori vulkanik lava diisi oleh Qla (Lava Anjasmara), Qltaw (Lava Tua Arjuno-Welirang), Qes(Lava Erupsi Samping), dan Qlw I (Lava Welirang I). Sedangkan kategori piroklastik diisi oleh Qaptaw (Aliran Piroklastik Tua Arjuno-Welirang) dan Qapw(Aliran Piroklastik Welirang). Untuk kategori lava vesikuler sendiri ditemukan pada beberapa batuan lava Qla dan Qltaw.

Pada analisa integrasi ini, akan dilihat hubungan dan sebaran setiap satuan batuan berdasarkan parameter densitas, kecepatan V_p , dan resistivitas. Hasil pengukuran tiap satuan batuan berdasarkan parameter tersebut beserta deskripsi singkat kondisi petrologi batuan dapat dilihat rangkumannya pada tabel 4.17.

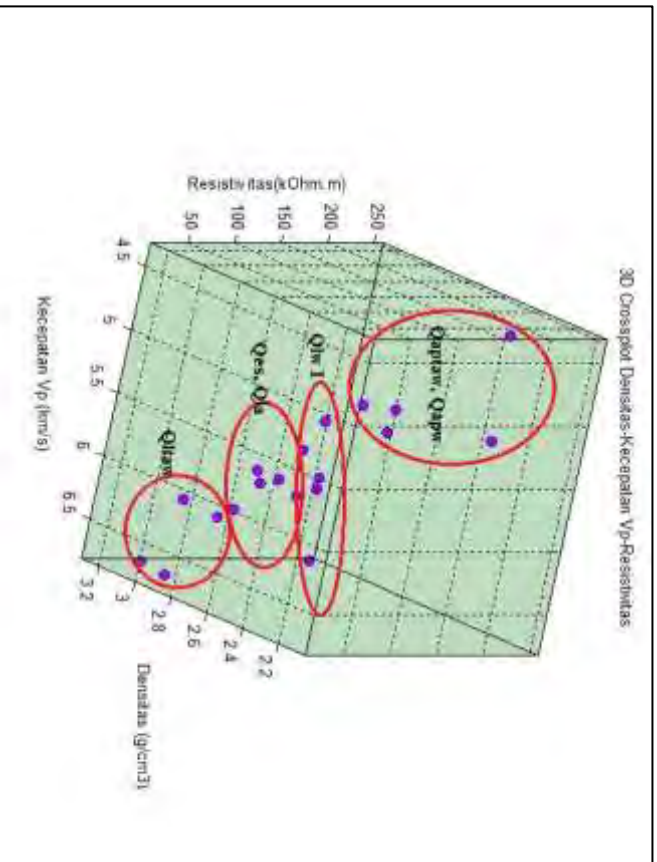


Gambar 4.14 Detail sampel satuan batuan yang telah diambil dilihat dari penampang *cross-section*

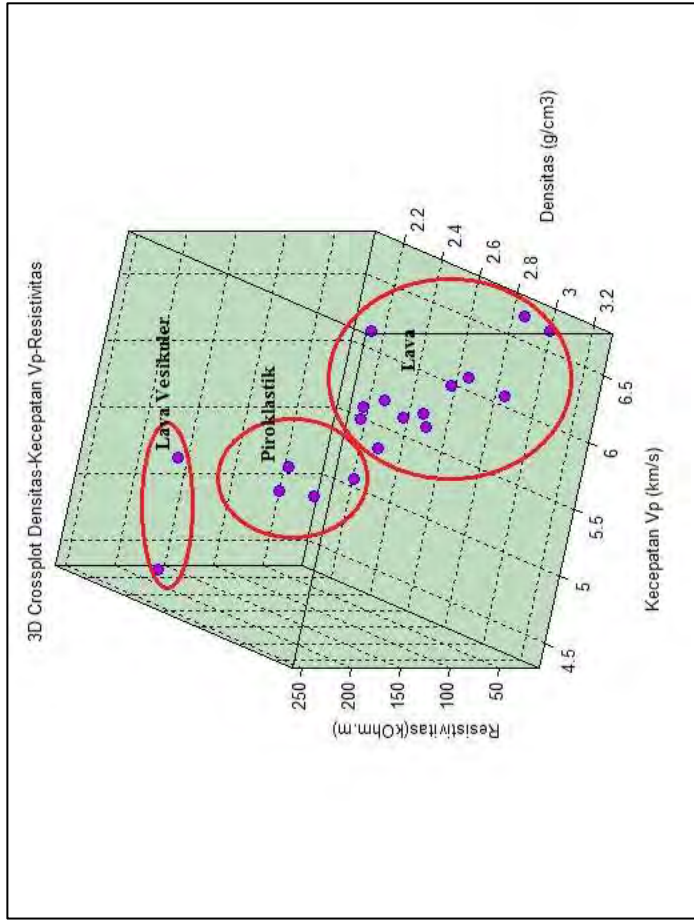
Tabel 4.17 Data densitas, kecepatan Vp, dan resistivitas, setiap sampel batuan vulkanik beserta deskripsi petrologi kondisi sampel

Satuan Batuan	Densitas (gram/cm ³)	Kecepatan (km/s)	Resistivitas (kOhm.m)	Deskripsi Petrologi
Qla1	2.994285714	6.651724138	9.808210928	Faneritik halus andesit-basaltis
Qla	2.631402778	5.705555556	38.03520112	Faneritik halus andesit-basaltis
Qla3	2.668231047	5.880888889	113.1787754	Afanitik andesit-basaltis
Qltaw	2.970470756	6.630952381	185.4776886	Mafik, afanitik, andesit-basaltis
Qltaw2	2.523846154	5.411267606	259.6811811	Vesikular, andesit-basaltis
Qltaw3	2.692	5.942051282	98.28053967	Vesikular, mafik, andesit-basaltis
Qltaw4	3.17634375	6.267088608	79.24601717	Mafik, afanitik andesit-basaltis
Qltaw5	3.003799392	6.763636364	40.95516963	Mafik, afanitik andesit-basaltis
Qaptaw1	2.57023622	5.515584416	68.79244937	Faneritik halus, blok andesit-basalt
Qaptaw2	2.431643836	5.105	130.6390014	Faneritik halus, blok andesit-basalt
Qes1	2.776083707	6.101176471	51.7967867	Faneritik sedang
Qes2	2.684666667	5.807692308	73.81769099	Faneritik sedang
Qlw1	2.759242424	6.1575	31.97416116	Felsik, Faneritik halus basalt
Qlw2	2.818282828	5.922058824	83.47904689	Faneritik halus basalt
Qlw3	2.635	5.76953125	106.2149583	Faneritik halus basalt
Qlw4	2.523870968	5.339473684	145.1617202	Faneritik halus basalt
Qlw5	2.168085106	4.363030303	181.3050656	Felsik, Vesikular, Faneritik halus basalt
Qapw1	2.457748918	5.213888889	63.07560194	Breksi basalt
Qapw2	2.457983539	5.080147059	99.41555793	Breksi basalt

Kemudian dari tabel 4.10 ini, data 3 parameter ini akan dibuat 3D *crossplot* untuk menganalisa hubungan parameter densitas, kecepatan Vp, dan atenuasi pada setiap sampel batuan. Pencantuman deskripsi singkat mengenai kondisi petrologi batuan membantu proses interpretasi sebaran setiap data.



Gambar 4.15 3D *Crossplot* Densitas (gram/cm³) -Kepcepatan Vp (km/s) -Resistivitas (kOhm. m) batuan vulkanik berdasarkan satuan batuan



Gambar 4.16 3D *Crossplot* Densitas (gram/cm³) –Kecepatan Vp (km/s) –Resistivitas (kOhm.m) berdasarkan produk batuan vulkanik

Untuk analisa integrasi antara parameter kecepatan Vp, densitas, dan resistivitas, maka dibuat 3D *crossplot* untuk melihat *trend* hubungan parameter tersebut berdasarkan kelompok satuan batuan dankelompok 3 kategori produk vulkanik (produk lava, piroklastik, dan lava vesikuler).

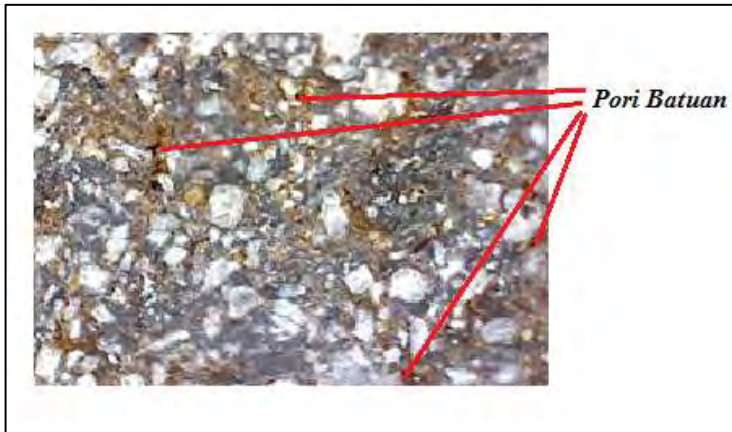
Untuk gambar 4.15 analisa 3D *crossplot* parameter berdasarkan satuan batuan menunjukkan densitas-kecepatan Vp meningkat dari QlwI, Qes, Qla, Qltaw dengan rentang densitas $2.7 - 2.9 \text{ g/cm}^3$ dan rentang kecepatan Vp $5.7 - 6.7 \text{ km/s}$. Kemudian resistivitasnya menyebar dari 50-120 kOhm.m. Kemudian untuk satuan batuan Qaptaw dan Qapw, nilai densitas dan Vp memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai satuan batuan lava, yakni memiliki rentang $2.4 - 2.5 \text{ g/cm}^3$ untuk densitas dan $5.0 - 5.5 \text{ km/s}$ untuk kecepatan Vp.

Selanjutnya untuk gambar 4.16, 3D *Crossplot* dianalisa berdasarkan 3 kategori produk batuan vulkanik, produk lava, lava vesikuler, dan piroklastik. Untuk kategori produk vulkanik lava ditunjukkan dengan naiknya *trend* densitas seiring dengan naiknya kecepatan Vp, kemudian resistivitasnya menyebar dari 50-120 kOhm.m. *Trendline* kategori lava ini diinterpretasikan bahwa lava yang diindikasikan lebih mafik dan rapat porositasnya, sehingga menghasilkan nilai densitas dan kecepatan Vp yang tinggi. Kemudian untuk kategori piroklastik dan lava vesikuler, densitas dan kecepatan Vp cenderung lebih kecil dari kategori batuan lava, namun memiliki resistivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lava.

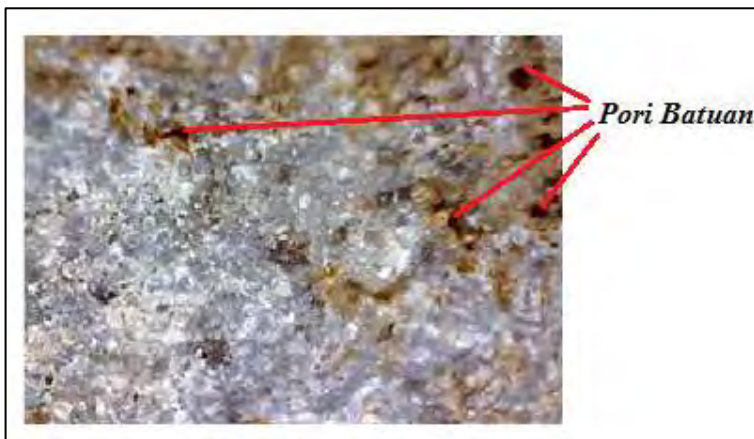
Batuan lava vesikuler atau berongga maupun piroklastik memiliki fase pendinginan yang cepat dan faktor tekanan yang rendah, sehingga menghasilkan bentukan pori di batuan karena mineral tidak terbentuk sempurna. Fase pendinginan yang cepat terjadi dikarenakan batuan mengalami kontak dengan udara secara cepat sehingga terbentuklah lubang-lubang yang dapat terisi mineral ataupun tidak.

Pada gambar 4.15, contoh kasus pada batuan piroklastik Qaptaw dan Qapw, lubang-lubang pori pada batuan ini terisi tuff vulkanik halus berwarna kecoklatan. Tuff ini mengisi batuan setelah batuan mengalami pendinginan yang cepat dan membentuk pori batuan, kemudian karena pada lubang tersebut tidak memiliki ikatan yang kuat dengan mineral apapun, maka tuff dapat terikat di batuan. Untuk jangka panjang sangat dimungkinkan terjadi porositas yang lebih besar akibat proses lubang-lubang pori batuan tersebut terisi oleh mineral lain. Batuan vulkanik yang memiliki porositas seperti pada satuan batuan

Qaptaw dan Qapw memiliki resistivitas yang tinggi akibat pori yang berada di batuan tidak menghambat aliran listrik yang masuk dan kontak dengan mineral batuan, sehingga lebih konduktif.



(a)



(b)

Gambar 4.16 Lubang-lubang gas pori batuan pada satuan batuan piroklastik Qaptaw (a) dan Qapw (b) yang terisi tuff halus kecoklatan

Sehingga dapat digaris bawahi bahwa pada batuan vulkanik dengan kondisi *dry rocks* jenis semua kategori, lava, lava vesikuler, maupun piroklastik, kecepatan V_p akan berbanding lurus dengan densitas, atau dapat didefinisikan kecepatan V_p akan naik seiring dengan naiknya densitas. Sedangkan resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan V_p , atau dapat didefinisikan resistivitas akan semakin naik nilainya, apabila nilai densitas-kecepatan V_p semakin turun nilainya. Hal ini karena pada kondisi *dry rock* atau pada saat batuan kering resistivitas batuan yang memiliki pori seperti pada kasus piroklastik dan lava vesikuler, lebih akan memiliki nilai resistivitas yang tinggi akibat perantara antar kontak mineralnya tidak serapat dengan kontak mineral pada batuan vulkanik produk lava, sehingga batuan ini tidak konduktif dibandingkan kategori lava yang memiliki sedikit pori. Namun apabila batuan ini tersisi fluida, maka batuan berporositas (piroklastik, lava vesikuler) ini akan jauh lebih konduktif dibandingkan kategori produk lava, karena fluida menjadi konduktor yang sangat baik pada tiap pori batuan ini.

Kemudian untuk deskripsi petrologi mengenai warna, struktur, tekstur, dan komposisi dominan mineral penting dilakukan pada proses identifikasi batuan vulkanik, karena hasil pengukuran parameter fisis batuan di penelitian ini (densitas, V_p , atenuasi, dan resistivitas) sangat dipengaruhi oleh faktor mineral, tekstur dan struktur batuanya. Sehingga deskripsi petrologi dapat membantu proses interpretasi hasil pengukuran dan analisa parameter yang telah didapat pengukuran sebagai hasil respon batuan terhadap gelombang dan arus listrik.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil data pengukuran resistivity setiap batuan

Coring Resistivitas	I(mAmpere)	V(Volt)	Luas(meter ²)	L(meter)	I(Ampere)	Dry_Resistivity(Ohm.m)	Rata-rata Dry_Resistivity(Ohm.m)
Qla1-A	1.45	490	0.00255	0.09645	0.00145	8936.042	9808.211
	1.43	491	0.00255	0.09645	0.00143	9079.514	
	1.36	492	0.00255	0.09645	0.00136	9566.285	
	1.25	493	0.00255	0.09645	0.00125	10429.27	
	1.34	494	0.00255	0.09645	0.00134	9748.533	
	1.3	492	0.00255	0.09645	0.0013	10007.81	
	1.25	496	0.00255	0.09645	0.00125	10492.74	
Qla-A	1.28	494	0.00255	0.09645	0.00128	10205.5	
	0.65	515	0.003619	0.1027	0.00065	27921.11	38035.2
	0.57	518	0.003619	0.1027	0.00057	32025.33	
	0.51	520	0.003619	0.1027	0.00051	35931.22	
	0.49	524	0.003619	0.1027	0.00049	37685.47	
	0.45	527	0.003619	0.1027	0.00045	41270.23	
	0.44	527	0.003619	0.1027	0.00044	42208.19	
Qla 3-A	0.43	527	0.003619	0.1027	0.00043	43189.77	
	0.42	525	0.003619	0.1027	0.00042	44050.29	
	0.14	537	0.003619	0.13232	0.00014	104913.2	113178.8
	0.13	545	0.003619	0.13232	0.00013	114666.6	
	0.13	548	0.003619	0.13232	0.00013	115297.8	
	0.13	547	0.003619	0.13232	0.00013	115087.4	
	0.13	550	0.003619	0.13232	0.00013	115718.6	
Qltaw-A	0.14	548	0.003619	0.13232	0.00014	107062.2	
	0.14	547	0.003619	0.13232	0.00014	106866.9	
	0.12	552	0.003619	0.13232	0.00012	125817.6	
	0.18	540	0.003636	0.0557	0.00018	195848.2	185477.7
	0.17	536	0.003636	0.0557	0.00017	205832.6	
	0.16	537	0.003636	0.0557	0.00016	219105.2	
	0.18	539	0.003636	0.0557	0.00018	195485.5	
Qltaw 2-B	0.18	538	0.003636	0.0557	0.00018	195122.8	
	0.19	542	0.003636	0.0557	0.00019	186227.6	
	0.25	549	0.003636	0.0557	0.00025	143360.9	
	0.25	547	0.003636	0.0557	0.00025	142838.6	
	0.23	332	0.003531	0.01921	0.00023	265343.9	259681.2
	0.21	330	0.003531	0.01921	0.00021	288864.1	
	0.21	320	0.003531	0.01921	0.00021	280110.6	

	0.21	369	0.003531	0.01921	0.00021	323002.6	
	0.29	350	0.003531	0.01921	0.00029	221854.9	
	0.28	344	0.003531	0.01921	0.00028	225839.2	
	0.26	346	0.003531	0.01921	0.00026	244625.5	
	0.28	347	0.003531	0.01921	0.00028	227808.7	
Qltaw3-A	0.12	487	0.003617	0.11587	0.00012	126686.4	98280.54
	0.17	490	0.003617	0.11587	0.00017	89976.58	
	0.12	489	0.003617	0.11587	0.00012	127206.7	
	0.17	493	0.003617	0.11587	0.00017	90527.46	
	0.17	491	0.003617	0.11587	0.00017	90160.2	
	0.18	494	0.003617	0.11587	0.00018	85671.58	
	0.17	492	0.003617	0.11587	0.00017	90343.83	
Qltaw-4	0.18	494	0.003617	0.11587	0.00018	85671.58	
	0.24	542	0.003626	0.1048	0.00024	78127.36	79246.02
	0.22	544	0.003626	0.1048	0.00022	85544.35	
	0.23	541	0.003626	0.1048	0.00023	81373.79	
	0.26	542	0.003626	0.1048	0.00026	72117.56	
	0.21	543	0.003626	0.1048	0.00021	89453.15	
	0.25	545	0.003626	0.1048	0.00025	75417.41	
	0.27	546	0.003626	0.1048	0.00027	69959.06	
Ltaw 5a	0.23	545	0.003626	0.1048	0.00023	81975.44	
	0.41	511	0.003599	0.1116	0.00041	40192.79	40955.17
	0.41	516	0.003599	0.1116	0.00041	40586.06	
	0.41	517	0.003599	0.1116	0.00041	40664.72	
	0.42	518	0.003599	0.1116	0.00042	39773.29	
	0.4	520	0.003599	0.1116	0.0004	41923.2	
	0.4	517	0.003599	0.1116	0.0004	41681.34	
	0.4	518	0.003599	0.1116	0.0004	41761.96	
Qptaw1-A	0.41	522	0.003599	0.1116	0.00041	41057.99	
	0.36	533	0.003617	0.08494	0.00036	63047.2	68792.45
	0.35	533	0.003617	0.08494	0.00035	64848.54	
	0.34	534	0.003617	0.08494	0.00034	66881.1	
	0.33	535	0.003617	0.08494	0.00033	69036.84	
	0.33	535	0.003617	0.08494	0.00033	69036.84	
	0.32	535	0.003617	0.08494	0.00032	71194.24	
Qptaw 2-B	0.31	532	0.003617	0.08494	0.00031	73078.73	
	0.31	533	0.003617	0.08494	0.00031	73216.1	
	0.69	523	0.003546	0.02042	0.00069	131623.8	130639
	0.7	524	0.003546	0.02042	0.0007	129991.5	
	0.72	514	0.003546	0.02042	0.00072	123968.8	
	0.66	512	0.003546	0.02042	0.00066	134712.5	
	0.68	513	0.003546	0.02042	0.00068	131005.7	
	0.67	511	0.003546	0.02042	0.00067	132442.6	
	0.69	523	0.003546	0.02042	0.00069	131623.8	

	0.7	523	0.003546	0.02042	0.0007	129743.4	
Qes1	0.76	506	0.003631	0.05186	0.00076	46614.35	51796.79
	0.72	507	0.003631	0.05186	0.00072	49301.28	
	0.71	507	0.003631	0.05186	0.00071	49995.66	
	0.68	507	0.003631	0.05186	0.00068	52201.35	
	0.67	509	0.003631	0.05186	0.00067	53189.47	
	0.66	509	0.003631	0.05186	0.00066	53995.37	
	0.68	510	0.003631	0.05186	0.00068	52510.23	
	0.63	509	0.003631	0.05186	0.00063	56566.58	
Qes2-A	0.41	523	0.00363	0.06795	0.00041	68142.15	73817.69
	0.4	523	0.00363	0.06795	0.0004	69845.71	
	0.39	524	0.00363	0.06795	0.00039	71773.6	
	0.37	523	0.00363	0.06795	0.00037	75508.87	
	0.33	526	0.00363	0.06795	0.00033	85147.09	
	0.35	526	0.00363	0.06795	0.00035	80281.54	
	0.39	533	0.00363	0.06795	0.00039	73006.35	
	0.43	538	0.00363	0.06795	0.00043	66836.21	
Qlw 1-A	0.47	536	0.002535	0.09852	0.00047	29347.26	31974.16
	0.48	535	0.002535	0.09852	0.00048	28682.24	
	0.46	538	0.002535	0.09852	0.00046	30097.12	
	0.42	533	0.002535	0.09852	0.00042	32657.17	
	0.42	534	0.002535	0.09852	0.00042	32718.44	
	0.41	533	0.002535	0.09852	0.00041	33453.68	
	0.4	535	0.002535	0.09852	0.0004	34418.69	
	0.4	535	0.002535	0.09852	0.0004	34418.69	
Qlw 2-A	0.19	551	0.002501	0.08054	0.00019	90070.78	83479.05
	0.23	547	0.002501	0.08054	0.00023	73866.14	
	0.21	546	0.002501	0.08054	0.00021	80753.11	
	0.21	543	0.002501	0.08054	0.00021	80309.41	
	0.2	545	0.002501	0.08054	0.0002	84635.47	
	0.19	544	0.002501	0.08054	0.00019	88926.5	
	0.2	545	0.002501	0.08054	0.0002	84635.47	
	0.2	545	0.002501	0.08054	0.0002	84635.47	
Qlw 3-A	0.18	546	0.002443	0.07385	0.00018	100358	106215
	0.18	546	0.002443	0.07385	0.00018	100358	
	0.18	549	0.002443	0.07385	0.00018	100909.4	
	0.18	547	0.002443	0.07385	0.00018	100541.8	
	0.17	549	0.002443	0.07385	0.00017	106845.3	
	0.17	544	0.002443	0.07385	0.00017	105872.2	
	0.16	549	0.002443	0.07385	0.00016	113523.1	
	0.15	550	0.002443	0.07385	0.00015	121311.9	
Qlw 4-A	0.13	553	0.002522	0.08116	0.00013	132181	145161.7
	0.12	551	0.002522	0.08116	0.00012	142678.2	
	0.11	554	0.002522	0.08116	0.00011	156496.4	
	0.12	551	0.002522	0.08116	0.00012	142678.2	
	0.11	553	0.002522	0.08116	0.00011	156213.9	

	0.13	552	0.002522	0.08116	0.00013	131942	
	0.11	551	0.002522	0.08116	0.00011	155649	
	0.12	554	0.002522	0.08116	0.00012	143455	
Qlw 5 - A	0.13	548	0.003645	0.07199	0.00013	213421.9	181305.1
	0.14	543	0.003645	0.07199	0.00014	196369.3	
	0.13	548	0.003645	0.07199	0.00013	213421.9	
	0.19	554	0.003645	0.07199	0.00019	147624.3	
	0.16	553	0.003645	0.07199	0.00016	174987.4	
	0.14	557	0.003645	0.07199	0.00014	201432.2	
	0.19	553	0.003645	0.07199	0.00019	147357.8	
	0.18	554	0.003645	0.07199	0.00018	155825.7	
Qapw1- B	0.33	525	0.002504	0.07508	0.00033	53061.57	63075.6
	0.3	525	0.002504	0.07508	0.0003	58367.73	
	0.29	527	0.002504	0.07508	0.00029	60610.43	
	0.27	529	0.002504	0.07508	0.00027	65347.15	
	0.28	531	0.002504	0.07508	0.00028	63251.56	
	0.26	530	0.002504	0.07508	0.00026	67988.79	
	0.26	530	0.002504	0.07508	0.00026	67988.79	
Qapw2- A	0.33	525	0.003632	0.06909	0.00033	83632.12	99415.56
	0.3	525	0.003632	0.06909	0.0003	91995.33	
	0.29	527	0.003632	0.06909	0.00029	95530.12	
	0.27	529	0.003632	0.06909	0.00027	102995.8	
	0.28	531	0.003632	0.06909	0.00028	99692.9	
	0.26	530	0.003632	0.06909	0.00026	107159.4	
	0.26	530	0.003632	0.06909	0.00026	107159.4	

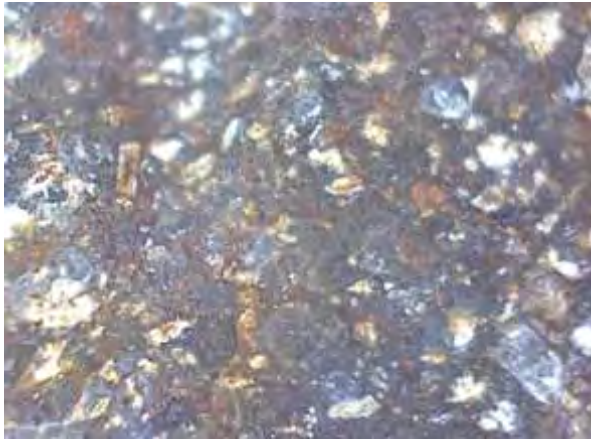
Lampiran 2. Hasil data pengukuran atenuasi

Satuan Batuan	Coring Atenuasi	Panjang (mm)	Amplitude (mVolt)	Koefisien Atenuasi α (dB/m) x 10 ⁻³
Qla (Lava Anjasmara)	Qla1-A	96.45	13	0.11469978
	Qla1-B	46.93	25	
	Qla-A	102.7	12	0.017857239
	Qla-C	27.72	14	
	Qla3-A	132.32	12	0.106116026
	Qla3-C	37.97	38	
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw-A	55.07	12	0.174611366
	Qltaw-B	20.59	24	
	Qltaw2-A	87.03	16	0.046478282
	Qltaw2-B	19.21	23	
	Qltaw3-A	115.87	15	0.125220464
	Qltaw3-C	19.71	60	
	Qltaw4-B	49.51	25	0.186997511
	Qltaw4-C	19.21	48	
	Qltaw5-A	111.6	17	0.056060892
Qaptaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaptaw1-A	84.94	12.5	0.114047297
	Qaptaw1-B	38.5	23	
	Qaptaw2-A	110.58	8	0.083332656
	Qaptaw2-B	20.42	19	
Qes(Erupsi Samping)	Qes1-A	51.86	18	0.157403133
	Qes1-B	20.11	32	
	Qes2-A	67.95	14	0.205257584
	Qes2-B	21.46	42	

QlwI(Lava Welirang I)	Qlw1-A	98.52	16	0.106705808
	Qlw1-B	32.51	36	
	Qlw2-A	80.54	11	0.156745637
	Qlw2-B	42.13	22	
	Qlw3-A	73.85	9	0.22272386
	Qlw3-C	24.38	32	
	Qlw4-A	81.16	6	0.166882896
	Qlw4-B	37.06	14	
	Qlw5-A	71.99	6.5	0.237455887
	Qlw5-B	18.57	28	
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1-A	75.08	12.5	0.087021079
	Qapw1-B	50.44	16	
	Qapw2-A	69.09	16	0.072892074
	Qapw2-B	42.5	20	

Lampiran 3. Hasil deskripsi petrologi batuan vulkanik

BORANG DESKRIPSI BATUAN BEKU



Nama : Lava Anjasmara (A)
 Kode Satuan Batuan : Qla
 Jenis Batuan Beku : Batuan vulkanik

Batuan berwarna abu-abu gelap, mempunyai struktur massif, ukuran kristal (fenokris : 1-2 mm, massa dasar 1-5 mm), menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin tekstur berdasarkan granularitas porfiroafanitik, berdasarkan hubungan antar kristal inequigranular, komposisi batuan : mineral utama piroksen, plagioklas, mineral sekunder kuarsa, olivin dan amfibol.

Deskripsi Mineralogi :

- ☐ Plagioklas berwarna putih susu, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur prismatik, massif, membutir, dan hadir sebagai fragmen batuan berbentuk subhedral.
- ☐ Piroksen berwarna hijau tua-hitam, kilap kaca, belahan 2 arah saling tegak lurus, struktur prismatik pendek membutir, hadir sebagai fragmen batuan.
- ☐ Kuarsa tidak berwarna, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur tidak teratur, membutir dan massif, dan hadir sebagai matriks batuan

- Olivine berwarna hijau, kilap kaca, belahan tidak sempurna, struktur tidak teratur, dan membutir, dan hadir sebagai matriks batuan.
- Amfibol berwarna hitam-coklat, kilap arang, belahan 2 arah membentuk sudut lancip, struktur prismatik panjang, menyerat, dan membutir, hadir sebagai matriks batuan

Diagenesa Batuan :-

Nama Batuan Beku (Klasifikasi) : Lava Andesit – Basaltis

BORANG DESKRIPSI BATUAN BEKU



Nama : Lava Arjuno-Welirang Tua

Kode Satuan Batuan : Qltaw

Jenis Batuan Beku : Batuan vulkanik

Batuan berwarna abu-abu kehitaman, mempunyai struktur masif, ukuran kristal < 1 mm), menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas afanitik, berdasarkan hubungan antar kristal hipidiomorfik granular komposisi batuan : mineral utama kuarsa, plagioklas, piroksen, mineral sekunder olivin dan amfibol.

Deskripsi Mineralogi :

- Kuarsa tidak berwarna, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur tidak teratur, membutir dan massif.

- Plagioklas berwarna putih susu, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur prismatik, massif, membutir, dan berbentuk subhedral.
- Piroksen berwarna hijau tua-hitam, kilap kaca, belahan 2 arah saling tegak lurus, struktur prismatik pendek membutir.
- Olivine berwarna hijau, kilap kaca, belahan tidak sempurna, struktur tidak teratur, dan membutir, dan berbentuk subhedral.
- Amfibol berwarna hitam-coklat, kilap arang, belahan 2 arah membentuk sudut lancip, struktur prismatik panjang, menyerat, dan membutir.

Diagenesa Batuan : -

Nama Batuan Beku (Klasifikasi) : Lava Andesit – Basaltis

BORANG DESKRIPSI BATUAN BEKU



Nama : Erupsi Samping (Lava Produk Gunung Pundak)

Kode Satuan Batuan : Qes

Jenis Batuan Beku : Batuan Vulkanik

Batuan berwarna abu-abu muda, mempunyai struktur vesikular, ukuran kristal 1-2 mm menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas faneritik halus, berdasarkan hubungan antar kristal allotiomorfik granular, komposisi batuan : mineral utama kuarsa, plagioklas mineral sekunder piroksen dan olivin

Deskripsi Mineralogi :

- Kuarsa tidak berwarna, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur tidak teratur, membutir dan massif.
- Plagioklas berwarna putih susu, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur prismatic, massif, membutir, dan berbentuk subhedral.
- Piroksen berwarna hijau tua-hitam, kilap kaca, belahan 2 arah saling tegak lurus, struktur prismatic pendek membutir.
- Olivine berwarna hijau, kilap kaca, belahan tidak sempurna, struktur tidak teratur, dan membutir, dan berbentuk subhedral.

Diagenesa Batuan :

Produk samping ini terbentuk setelah pembentukan lava Arjuno-Welirang tua yang muncul melalui 13 zona struktur di bagian samping kompleks Arjuno–Welirang, memiliki ketinggian sampai 300 m dari lereng sampingnya.

Nama Batuan Beku (Klasifikasi) : Lava Andesit – Basaltik

BORANG DESKRIPSI BATUAN BEKU



Nama : Lava Welirang I

Kode Satuan Batuan : Qlw I

Jenis Batuan Beku : Batuan Vulkanik

Batuan berwarna abu-abu muda, mempunyai struktur vesikular, ukuran kristal 1-2 mm menunjukkan tekstur berdasarkan kristalinitas holokristalin, tekstur berdasarkan granularitas faneritik halus, berdasarkan hubungan antar kristal allotiomorfik granular, komposisi batuan : mineral utama kuarsa, plagioklas mineral sekunder piroksen dan olivin

Deskripsi Mineralogi :

- ☐ Kuarsa tidak berwarna, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur tidak teratur, membutir dan massif.
- ☐ Plagioklas berwarna putih susu, kilap kaca, belahan 3 arah, struktur prismatic, massif, membutir, dan berbentuk subhedral.
- ☐ Piroksen berwarna hijau tua-hitam, kilap kaca, belahan 2 arah saling tegak lurus, struktur prismatic pendek membutir.
- ☐ Olivine berwarna hijau, kilap kaca, belahan tidak sempurna, struktur tidak teratur, dan membutir, dan berbentuk subhedral.
- ☐ Amfibol berwarna hitam-coklat, kilap arang, belahan 2 arah membentuk sudut lancip, struktur prismatic panjang, menyerat, dan membutir.

Diagenesa Batuan :

Satuan ini diduga merupakan produk Sin-Arjuno Welirang yang terbentuk setelah terjadinya kolaps/subsiden pada batuan pra-Arjuno Welirang. Munculnya lava Welirang kemungkinan diakibatkan oleh terbentuknya struktur regional yang berarah baratlaut–tenggara yang memfasilitasi naiknya lava melalui zona tersebut ke permukaan. Struktur tersebut sejajar dengan munculnya pusat erupsi Gunung Kembar I, II dan Arjuno.

Nama Batuan Beku (Klasifikasi) : Lava Basalt

BORANG DESKRIPSI BATUAN PIROKLASTIK



Nama : Aliran Piroklastik Tua Arjuno Welirang
 Kode Satuan Batuan : Qaptaw

Warna:

Abu-abu tua kecoklatan

Struktur:

Vesikuler aliran, terdapat aliran kristal dan pori lubang gas

Tekstur:

Memiliki tekstur blok dengan ukuran butir 64-256 mm, dengan bentuk butir meruncing hingga hampir membulat

Deskripsi Komposisi*Fragmen*

Plagioklas, piroksen, kuarsa, olivine, dan amfibol

Matriks :

Tufa pasir berwarna kecoklatan

Diagenesa :

Satuan ini diperkirakan merupakan produk eksplosif dari tubuh lava tua komplek Arjuno-Welirang yang berumur Kuartar awal, hal tersebut berkaitan dengan munculnya pumice dan scoria yang merupakan material hasil eksplosif besar. Disamping itu pembentukan satuan ini diperkirakan berhubungan dengan runtuhnya tubuh Arjuno-Welirang yang membentuk struktur ring fracture

Nama batuan:

Scoria, blok andesit-basaltik

BORANG DESKRIPSI BATUAN PIROKLASTIK

Nama : Aliran Piroklastik Welirang

Kode Satuan Batuan : Qapw

Warna:

Abu-abu muda kecoklatan

Struktur:

Breksi piroklastik

Tekstur (bentuk butir, ukuran butir, komposisi fragmen dan matriks):

Memiliki tekstur blok dengan ukuran butir 64-256 mm, dengan bentuk butir meruncing hingga hampir membulat

Deskripsi Komposisi*Fragmen*

Plagioklas, piroksen, kuarsa, olivine, dan amfibol

Matriks :

Tufa pasir berwarna kecoklatan

Diagenesa :

Diperkirakan terbentuk sebagai akibat adanya letusan eksplosif yang juga membentuk ring fracture yang menghasilkan produk aliran piroklastik yang tersebar luas dengan jatuhnya piroklastik tipis.

Nama batuan:

Breksi piroklastik basalt

Lampiran 4. Beberapa hasil pengambilan data time travel untuk kecepatan V_p dan amplitude atenuasi





Lampiran 5. Data statistik pengukuran densitas

Satuan Batuan	Coring Densitas	Densitas_Kering (g/cm ³)	Mean	Median	Range	Varians	Standar Deviasi	Standar Error
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-B	2.9943	2.7646398	2.668231	0.3628829	0.039891999	0.1997298	7.2244424
	Qla	2.6314						
	Qla3-C	2.6682						
Qlaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qlaw-B	2.9705	2.873292	2.9704708	0.6524976	0.06832386	0.2613883	9.0971726
	Qlaw2-B	2.5238						
	Qlaw3-C	2.692						
	Qlaw4-C	3.1763						
Qaplaw (Aliran Piroklasik Arjuno welirang Tua)	Qlaw5-C	3.0038	2.50094	2.50094	0.1385924	0.009603925	0.0979996	3.9185112
	Qaplaw1-B	2.5702						
Qes (Erupsi Sampling)	Qaplaw2-B	2.4316	2.7303752	2.7303752	0.091417	0.004178538	0.0646416	2.3674991
	Qes1-B	2.7761						
	Qes2-B	2.6847						

Lampiran 6. Data statistik pengukuran resistivitas

Satuan Batuan	Coring Resistivitas	Rata-Rata Resistivitas Kering (Ohm.m)	Mean	Median	Range	Varians	Standar Deviasi	Standar Error
Qla(Lava Anjasmara)	Qla1-A	9.8082109	53.6740625	38.03320112	103.3705645	2854.798891	43.62567204	25.18729349
	Qla-A	38.033201						
	Qla3-A	113.17878						
	QlaAw-A	185.47769						
Qltaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qltaw2-A	259.68118	132.7281192	98.28053967	161.4006414	7842.210563	88.55625648	39.60356187
	Qltaw3-A	98.28054						
	Qltaw4-A	79.246017						
	Qltaw5-A	40.95317						
	Qaplaw1-A	68.792449						
Qaplaw (Aliran Piroklasitik Arjuno welirang Tua)	Qaplaw2-B	130.639	99.71572536	99.71572536	61.84655199	1912.497996	43.7321163	30.92327599
	Qes1-A	51.796787	62.80723884	62.80723884	22.02090429	242.4601129	15.571130	11.01045215

Samping) Qlw1(Lava Welirang I)	Qes2-A	73.817691					75	
	Qlw1-A	31.974161						
	Qlw2-B	83.479047						
	Qlw3-A	106.21496	109.6269904	106.2149583	149.3309044	3281.445572	57.283903 26	25.61814034
	Qlw4-A	145.16172						
	Qlw5-A	181.30507						
Qapw (Aliran Piroklastik Welirang)	Qapw1-B	63.075602						
	Qapw2-A	99.415558	81.24557994	81.24557994	36.33995398	660.2962004	25.696229 3	18.16997799

Lampiran 7. Data statistik pengukuran kecepatan Vp

Satuan Batuan	Coring Velocity	Vp (km/s)	Mean	Median	Range	Varians	Standar Deviasi	Standar Error
Qla (Lava Anjasmara)	Qla1-A	6.6517241	6.079389527	5.880888889	0.9461686	0.2533606	0.50334941	0.290608915
	Qla-A	5.70555556						
	Qla3-A	5.8808889						
Qlaw (Lava Tua Arjuno Welirang)	Qlaw-A	6.6309524	6.202999248	6.267088608	1.3523688	0.2991245	0.54692279	0.244591306
	Qlaw2-A	5.4112676						
	Qlaw3-A	5.9420513						
	Qlaw4-A	6.2670886						
	Qlaw5-A	6.7636364						
Qaplaw (Aliran Piroklastik Arjuno welirang Tua)	Qaplaw1-A	5.5155844	5.310292208	5.310292208	0.4105844	0.0842898	0.29032702	0.205292208
	Qaplaw2-B	5.105						
Qes (Erupsi Sampping)	Qes1-A	6.1011765	5.954434389	5.954434389	0.2934842	0.0430665	0.20752464	0.146742081
	Qes2-A	5.8076923						

Lampiran 8. Data statistik pengukuran koefisien a atenuasi

Satuan Batuan	Coring Densitas	Koefisien Atenuasi α (dB/m) x 10^{-3}	Mean	Median	Range	Varians	Standar Deviasi	Standar Error Pengukuran
Q1a(Lava Anjasmara)	Q1a1	0.11469978	0.079557682	0.106116026	0.096843	0.002874	0.053606237	0.030949575
	Q1a	0.017857239						
	Q1a3	0.106116026						
	Q1aw	0.174611366						
Q1aw (Lava Tua Arjuno Weirang)	Q1aw	0.046478282	0.117873703	0.125220464	0.140519	0.004242	0.065133263	0.029128481
	Q1aw	0.125220464						
	Q1aw4	0.186997511						
	Q1aw5	0.056060892						
	Q1aw1	0.114047297						
Q1aw (Aliran Piroklasitik Arjuno weirang Tua)	Q1aw2	0.0833332656	0.098689976	0.098689976	0.030715	0.000472	0.021718531	0.01535732

Qes (Erupsi Samping)	Qes1	0.157403133	0.181330359	0.181330359	0.047854	0.001145	0.033838207	0.023927226
	Qes2	0.205257584						
Qlw(Lava Welirang I)	Qlw1	0.106705808						
	Qlw2	0.156745637						
	Qlw3	0.22272386	0.178102818	0.166882896	0.13075	0.002798	0.05289937	0.023657317
	Qlw4	0.166882896						
	Qlw5	0.237455887						
Qapw(Alir an Piroklastik Welirang)	Qapw1	0.087021079	0.079956577	0.079956577	0.014129	9.98E-05	0.009990715	0.007064502
	Qapw2	0.072892074						

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari Penelitian yang sudah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Rentang parameter densitas batuan vulkanik Arjuno Welirang berkisar antar 2400 – 2900 kg/m³, sedangkan rentang resistivitas bervariasi dari 30-185 kOhm.m, kemudian rentang nilai kecepatan Vp bervariasi dari 5100-6700 m/s, dengan koefisien atenuasinya memiliki rentang 0.05–0.23×10⁻³dB/m.
2. Rentang parameter batuan vulkanik pada poin 1 menunjukkan bahwa batuan vulkanik *dry rocks* memiliki nilai densitas, kecepatan Vp, faktor atenuasi, dan resistivitas yang tinggi dibandingkan dengan batuan kelompok lain seperti batuan sedimen.
3. Dari hasil pengukuran dan analisa pada batuan vulkanik *dry rocks*, nilai densitas akan berbanding lurus dengan kecepatan Vp, dan nilai resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan Vp.
4. Dari 6 satuan batuan yang diambil yang telah dianalisa hubungan setiap parameternya, berdasarkan perbedaan *trend* dan sebaran data pada *crossplot*, maka batuan vulkanik sampel dapat dikelompokkan 3 kategori produk batuan vulkanik, yakni produk kategori lava, piroklastik, dan lava vesikular.
5. Tipe batuan vulkanik Gunung Arjuno-Welirang merupakan tipe *intermediate* hingga mafik, dengan dominasi batuan andesit-basaltik dan basalt.
6. Karena hasil parameter fisis (densitas, Vp, atenuasi, dan resistivitas) batuan vulkanik sangat dipengaruhi oleh faktor mineral, tekstur dan struktur batumannya, maka deskripsi petrologi dapat membantu proses interpretasi hasil pengukuran dan analisa setiap parameter.

5.2 Saran

Saran dari penelitian ini adalah :

1. Pada penelitian ini dari 1 satuan batuan telah diambil 3-5 sampel, dengan pengambilan data sampel yang lebih banyak 10-15 sampel batuan per satuan batuan dapat menunjang akurasi data
2. Karena penelitian ini fokus pada 6 satuan batuan yang dominan dari 15 satuan batuan lainnya, maka pengambilan sampel pada 9 satuan batuan lainnya perlu dilakukan untuk melengkapi data fisika batuan keseluruhan Komplek Gunung Arjuno-Welirang.
3. Karena pengukuran penelitian ini dilakukan pada kondisi *dry rocks* dengan batasan batuan permukaan, untuk penelitian lanjutan dapat disarankan untuk penambahan faktor variabel pengkondisian sampel seperti temperatur, tekanan, dan *fracture*.
4. *Database* yang terkumpul pada laporan penelitian tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi parameter input *forward modeling* pada perencanaan desain akusisi dan *processing* serta parameter evaluasi interpretasi pada inversi *modeling* berbagai metode geofisika, terutama metode seismik, *gravity*, *resistivity*, dan elektromagnetik untuk kondisi lingkungan vulkanik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abousrafa, E.M., Somerville, J.M., Hamilton, S.A. Holden, P.W., 2013, *A laboratory measurement technique for axial and radial resistivity at ambient or reservoir stress state conditions* Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh E ,UK
- Berita Berkala Vulkanologi*, Edisi Khusus, 1992, G. Arjuno-Welirang.
- Brocher, T., 2005, Relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 95, 6, 2081–2092.
- Christensen, N.I. and Mooney, W.D., 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. *J. Geophys. Res.*, 100, 9761–9788.
- Daud, Dr. Yunus. 2007. DC Resistivity Notes. Depok : Peminatan Geofisika. Departemen Fisika UI.
- Fisher, R. V. & Schmincke H.-U., (1984) *Pyroclastic Rocks*, Berlin, Springer-Verlag.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics.*, 39, 770–780.
- Holford, S.P., N. Schofield, J.D. Macdonald, I.R. Duddy, and P.F. Green, 2012, Seismic analysis of igneous systems in sedimentary basins and their impacts on hydrocarbon prospectivity: examples from the southern Australian margin: *The APPEA Journal*, v. 52, p. 52
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R., 1993, *Volcanic Textures : A Guide to the Interpretation Textures in Volcanic Rocks.*, CODES Key Centre, University of Tasmania.
- Mavko, G., Mukerji T., Dvorkin J., 2009, *The Rock Physics Handbook : Tools for Seismic Analysis of Porous Media*, Cambridge

University Press, New York

Merkulova, W.M., 1972. Pogloschenie ultrasvukovykh voln v gornych porodach v oblasti castot 10_160 kHz. Izvestija A. N. SSSR Fiz. Sem. 22, 20_25.

Schminke, H.U. 2004. *Volcanism*. Springer –Verlag, 324 pp. ISBN : 9783540436508

Schoen, J. H., 2011, Handbook of Petroleum Exploration and Production Volume 8 :Physical Properties of Rocks, Oxford UK, Elsevier.

Sutikno, Bronto. 2002. Vulkanologi. Staf Pengajar pada Jurusan Teknik Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta.

Syarifuddin, M. Z. 1990. Gunung Bromo. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi

Zainuddin, et al. 2007. Laporan Pengamatan Terpadu Gunung Api Bromo. Bandung: Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.

BIOGRAFI PENULIS



Yulia Nur Fajrina lahir di Serang pada tanggal 1 Juli 1994. Pendidikan formal yang ditemuhnya antara lain SD YPWKS III Cilegon, SMPIT Raudhatul Jannah Cilegon, SMAN Cahaya Madani Banten Boarding School. Tahun 2012, penulis resmi menjadi mahasiswa pada Jurusan Teknik Geofisika FTSP Institut Teknologi Sepuluh November. Riwayat organisasi penulis selama di ITS diantaranya menjadi Sekretaris I SPE ITS SC (*Society of Petroleum Engineers ITS Student Chapter*) pada tahun 2015 dan organisasi tersebut mendapat *Awarding Gold Standard Student Chapter* dari seluruh SC dunia pada tahun 2015. Penulis juga menjadi Sekretaris 1 dan menjadi pelopor berdirinya HMTG-ITS pada tahun 2014-2-2015. Beberapa paper yang telah dipublikasikan diantaranya “*Gas Hydrates Exploration Using Continuous Wavelet Transform Based on Spectral Decomposition 2016*” pada *40 th IPA Convention & Exhibition*, “*Evaluation of Seismic Exploration in Sub-Volcanic Reservoir Area by Synthetic Seismic Modeling*” pada *39 th IPA Convention & Exhibition 2015*, dan “*Study of Geomagnetic Method for Mapping Buried Pipes in ITS Campus Area*” pada *The 10th International Student Conference on Advanced Science & Technology 2015-ITS & Kumamoto University*. Prestasi yang penulis raih selama kuliah diantaranya Mahasiswa Berprestasi Jurusan Teknik Geofisika 2015, *Best Poster Presenter IPS Student Session 2015*, dan *XL Future Leaders Batch 3 (2015-2016)*.